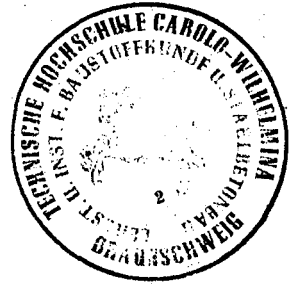


INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM



FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT

VON LEICHTZUSCHLÄGEN

von
K.-S. Schmidt-Kürbitz

Forschungsbericht

für den

Deutschen Ausschuß für Stahlbeton

Az.: V 104.4 (Vn/6)

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text:	Seite	1 bis	65
33 Tabellen:	Seite	66 bis	121
45 Abbildungen:	Seite	122 bis	154

Marx 1971

Dipl.-Ing. Klaus-Dieter Schmidt-Hurtienne

35 K a s s e l

Tiessenstr. 2

Tel.: 0561/41370

Bearb.:	
Termin:	WV.:
Eingang	1 2. JULI 1971
Brief-Nr.	
z. Kenntnis an:	

Herrn

Prof. Dr.-Ing. K. Kordina
Institut für Baustoffkunde und
Stahlbetonbau

33 Braunschweig

Beethovenstr. 52

Kassel, den 10. 7. 1971

Betr.: Festigkeitseigenschaften und Verformbarkeit von Leichtzuschlägen
- Zusammenfassung -

Sehr geehrter Herr Professor!

Sie erhalten hiermit die für den 5. bis 7. Juli versprochene Zusammenfassung zum o. g. Forschungsbericht. Hoffentlich findet der Entwurf Ihren Beifall, so daß Sie keine weitere Last damit haben.

Auf einen Punkt möchte ich aufmerksam machen. Ich habe im 2. Absatz die Geldgeber aufgezählt. Falls das unklug ist, müßte dieser Absatz gestrichen bzw. überklebt werden.

Am 6. Juli war ich in Düsseldorf beim Werner Verlag und habe alles für die Drucklegung meiner Arbeit in der Schriftenreihe der Institute für Konstruktiven Ingenieurbau der TU geregelt. Mit dem Erscheinen des Heftes ist gegen Ende des Jahres zu rechnen. Zu diesem Zeitpunkt wird somit auch die übliche Rechnung von DM 500,-- an das Institut zu erwarten sein.

Mit freundlichen Grüßen

Klaus-Dieter Schmidt-Hurtienne

Anlage!

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Forschungsbericht

für den

Niedersächsischen Kultusminister

Erlaß vom 15.6.1967 – II A B V 4e – 19/67 –

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text:	Seite	1 bis	65
33 Tabellen:	Seite	66 bis	121
45 Abbildungen:	Seite	122 bis	154

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Forschungsbericht
für die
Deutsche Forschungsgemeinschaft

Az.: KO 204/11

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text: Seite 1 bis 65

33 Tabellen: Seite 66 bis 121

45 Abbildungen: Seite 122 bis 154

Braunschweig, Juli 1971

Zusammenfassung

Festigkeitseigenschaften und Verformbarkeit von Leichtzuschlägen (AIF Nr. 1386)

Die Druckfestigkeit des Leichtbetons hängt entscheidend von der Kornfestigkeit des Zuschlags, der Druckfestigkeit des Mörtelgerüsts, dem Verhältnis der Elastizitätsmoduln von Zuschlag und Mörtel und den aufnehmbaren Bindekräften zwischen Zuschlag und Mörtel ab. Das vorliegende Forschungsvorhaben liefert einen Beitrag zur Frage der experimentellen Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Leichtzuschlägen. Ihr Einfluß auf die entsprechenden Eigenschaften des Leichtbetons wird untersucht. Die angewandten Versuchsmethoden werden im Hinblick auf eine mögliche Qualitätskontrolle geprüft.

Für die Untersuchungen wurden drei artverschiedene künstlich hergestellte Leichtzuschlagtypen ausgewählt: Blähschiefer Norlit und die Blähtone Leca und Detoon. Das Versuchsprogramm umfaßte Einkorn- und Mehrkornbetonversuche sowie Untersuchungen am Zuschlagaufwerk nach dem bekannten Druckzylinderverfahren.

Zielgrößen der Einkornbetonversuche waren Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul. Für jeden Zuschlagtyp wurden folgende Einflußgrößen variiert:

- a) Korngröße $2 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 25 \text{ mm}$
- b) Kornrohddichte $0,6 \text{ g/cm}^3 < \rho < 1,8 \text{ g/cm}^3$
- c) Mörteldruckfestigkeit $200 \text{ kp/cm}^2 < \beta_m < 600 \text{ kp/cm}^2$
- d) E-Modul des Mörtels $100000 \text{ kp/cm}^2 < E_m < 200000 \text{ kp/cm}^2$

Als Prüfkörper dienten Zylinder mit einem Durchmesser von $d = 5 \text{ cm}$ und einer Höhe von $h = 7 \text{ cm}$. Insgesamt wurden 322 Einkornbetonprüfkörper und 138 zugehörige Mörtelprüfkörper geprüft. Die Zuschlagvolumenkonzentration betrug im Mittel $v_a = 0,55$.

Im Rahmen der Mehrkornbetonversuche wurden 16 unterschiedliche Leichtbetonrezepturen untersucht. Als Prüfkörper dienten Würfel mit 20 cm Kantenlänge und Prismen mit den Abmessungen 15/15/70 cm.

Der Umfang der an den Leichtzuschlägen durchgeführten Druckzylinderversuche betrug 36 Prüfserien. In der Regel bestand eine Versuchsserie aus 5 Einzelprüfungen. Variiert wurden folgende Einflußgrößen:

- a) Korngröße $2 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 25 \text{ mm}$
- b) Kornrohddichte $0,6 \text{ g/cm}^3 < \rho < 1,8 \text{ g/cm}^3$

Die Versuche führten im einzelnen zu folgenden Ergebnissen:

Unter der Voraussetzung, daß alle übrigen Parameter wie Mörteldruckfestigkeit und Zuschlagvolumenkonzentration nicht verändert werden, nimmt die Einkornbetondruckfestigkeit mit steigender Zuschlagkornrohddichte zu. Wie Tafel 1 zeigt, ist der von der Kornrohddichte abhängige Druckfestigkeitsanstieg um so größer, je höher die zugehörige Druckfestigkeit des Mörtels gewählt wird. Für Blähschieferzuschläge strebt die Einkornbetondruckfestigkeit einem Festigkeitsgrenzwert zu. Diesem Grenzwert ist eine von der Korngröße abhängige Kornrohddichte zugeordnet. Demgegenüber wurde für Blähtone ein Abfall der Einkornbetondruckfestigkeit nach Überschreiten der jeweiligen Grenzkornrohddichte verzeichnet. Für konstant gehaltene Korngröße und Kornrohddichte ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Mörteldruckfestigkeit und Einkornbetondruckfestigkeit, der in etwa bis zu einer Mörteldruckfestigkeit von $\beta_m \approx 300 \text{ kp/cm}^2$ als linear bezeichnet werden kann. Mit weiter ansteigender Mörteldruckfestigkeit vermindert sich die Festigkeitszunahme des Einkornbetons, so daß die Einkornbetondruckfestigkeit bei einer Mörteldruckfestigkeit, die je nach Zuschlag, Korngruppe und Kornrohddichte zwischen $\beta_m = 500 \text{ kp/cm}^2$ und 700 kp/cm^2 schwanken kann, einen Grenzwert erreicht.

Tafel 1

Zuschlag	Korngruppe (mm)	Kornroh- dichte ρ [g/cm ³]	Einkornbetondruckfestigkeit β_b [kp/cm ²] für eine Mörteldruckfestigkeit	
			$\beta_m = 215$ [kp/cm ²]	$\beta_m = 585$ [kp/cm ²]
Norlit	3 - 7	0,9	120	260
		1,5	220	600
	7 - 15	0,7	120	170
		1,8	200	480
	15 - 25	0,7	100	150
		1,6	160	350
Leca	3 - 7	0,7	110	210
		1,1	180	420
	7 - 15	0,6	90	140
		1,1	150	310
	15 - 20	0,6	80	140
		0,9	110	210
Detoon	2 - 5	1,1	160	410
		1,5	280	690
	5 - 12	1,2	200	470
		1,6	270	660

Die Einkornbetonversuche zeigen weiter, daß der Elastizitätsmodul der Leichtzuschläge mit steigender Kornrohddichte größer wird.

Das für die Druckzylinderversuche verwendete Gerät besaß einen lichten Durchmesser von 75 mm und eine Füllhöhe von 150 mm. Gemessen wurde der

Lastverformungszusammenhang. Die gewonnenen Versuchskurven weisen durchweg einen linearen Anfangsbereich auf, dessen Anstieg K mit anwachsender Kornrohddichte größer wird. Für Norlit und Leca läßt sich mit steigendem K -Wert eine Erhöhung der zu erwartenden Einkornbetondruckfestigkeit feststellen. Die am Detoon-Zuschlag gewonnenen Ergebnisse zeigen aber deutlich, daß nicht immer aus einem hohen K -Wert auch eine entsprechende hohe Einkornbetondruckfestigkeit gefolgert werden darf. Um somit Fehlschlüsse zu vermeiden, ist es unerlässlich, das Verhalten eines Zuschlags unter den speziellen Versuchsbedingungen des Druckzylinderverfahrens in vollem Umfang abzuklären. Hierbei sind Vergleichsversuche durchzuführen, die eine echte Festigkeitsaussage ermöglichen. Als derartige Vergleichsversuche können beispielsweise die im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschriebenen Einkornbetonversuche dienen.

Mit Hilfe eines Festigkeitsmodells, das Zuschlagkornrohddichte und Betonzusammensetzung berücksichtigt, wurden unter Verwendung der Ergebnisse der Einkornbetonversuche die Druckfestigkeitsergebnisse der Mehrkornbetone nachgerechnet. Für die Abweichung zwischen Rechnung und Versuch ergab sich ein Variationskoeffizient von 9,7 %. Mit dem gewählten Festigkeitsmodell ist es grundsätzlich möglich, den Einfluß der Kornrohddichte sowie des gewählten Größtkorndurchmessers auf die Druckfestigkeit von Leichtbeton beliebiger Zusammensetzung zu untersuchen. Derartige Untersuchungen zeigen, daß sich die Leichtbetondruckfestigkeit um 35 % bis 40 % verringert, wenn sämtliche enthaltenen Leichtzuschläge > 3 mm eine Verminderung der Kornrohddichte von im Mittel 50 % erfahren.

Eine Nachrechnung der E-Moduln verschiedener Leichtbetone ergab Abweichungen bis zu 18 %.

7x

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Forschungsbericht
für die
Deutsche Forschungsgemeinschaft
Az.: KO 204/11

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text: Seite 1 bis 65
33 Tabellen: Seite 66 bis 121
45 Abbildungen: Seite 122 bis 154

Postsendungen:
33 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 478 22 81

Fernschreiben: 9 526 98 lbaib d

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

4x

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Forschungsbericht
für den
Niedersächsischen Kultusminister
Erlaß vom 15.6.1967 – II A B V 4e – 19/67 –

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text:	Seite	1 bis	65
33 Tabellen:	Seite	66 bis	121
45 Abbildungen:	Seite	122 bis	154

4x

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Forschungsbericht
für den
Deutschen Ausschuß für Stahlbeton
Az.: V 104.4 (Vn/6)

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text:	Seite	1 bis	65
33 Tabellen:	Seite	66 bis	121
45 Abbildungen:	Seite	122 bis	154

Postsendungen:
33 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 478 22 81

Fernschreiber: 9 526 98 libetb d

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND VERFORMBARKEIT
VON LEICHTZUSCHLÄGEN

Bericht über
Grundlagenforschung im Zusammenhang
mit dem Forschungsthema
"Traglast von knickgefährdeten Druckgliedern
aus Stahlleichtbeton"

für die
Arbeitsgemeinschaft Industrieller
Forschungsvereinigungen e. V.
Forschungsvorhaben Nr. 1386

Der Bericht umfaßt 154 Seiten

Text:	Seite	1 bis	65
33 Tabellen:	Seite	66 bis	121
45 Abbildungen:	Seite	122 bis	154

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Aufgabenstellung	1
2. Voruntersuchungen	2
2.1 Umfang und Zielsetzung	2
2.2 Versuche am Leichtzuschlagkorn	4
2.3 Versuche an Sieblinienbetonen	5
2.4 Diskussion der Ergebnisse	9
3. Hauptuntersuchungen	10
3.1 Versuchsprogramm	10
3.1.1 Einkornbetonversuche	10
3.1.2 Mehrkornbetonversuche	11
3.1.3 Druckzylinderversuche	13
3.2 Eigenschaften der verwendeten Leichtzuschläge	15
3.2.1 Kornrohddichte und Schüttdichte	15
3.2.2 Wassersaugfähigkeit der Leichtzuschläge	16
3.2.3 Siebanalyse für das Ausgangsmaterial	17
3.2.4 Trennung der Leichtzuschläge nach Kornrohddichte- klassen	17
3.2.5 Siebanalysen der Zuschläge der einzelnen Kornroh- dichteklassen	18
3.3 Untersuchungen an Einkornbetonen in Abhängigkeit von der Zuschlagkornrohddichte und Mörteldruckfestigkeit	19
3.3.1 Versuchsdurchführung	19
3.3.2 Versuchsergebnisse	22
3.3.2.1 Druckfestigkeit und E-Modul des Mörtels	22
3.3.2.2 Druckfestigkeit von Einkornbetonen in Abhängigkeit von der Kornrohddichte bei konstanter Mörteldruckfestigkeit	26

	<u>Seite</u>
3.3.2.3 Die Abhängigkeit der Einkornbetondruck- festigkeit von der Mörteldruckfestigkeit	31
3.3.2.4 Streuungen der Druckfestigkeitsergebnisse	31
3.3.2.5 E-Modul der Einkornbetone in Abhängigkeit von der Kornrohddichte bei konstantem E-Modul des Mörtels	33
3.3.2.6 E-Modul der Einkornbetone in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels	33
3.4 Untersuchungen an Einkornbetonen mit Leichtzuschlägen des Ausgangsmaterials	34
3.5 Untersuchungen an Einkornbetonen aus natürlichen Zuschlägen	35
3.6 Vergleichsversuche an Einkornbetonen mit Würfeln von 20 cm Kantenlänge und kritische Beurteilung der Druckfestigkeits- ergebnisse	38
3.7 Untersuchungen an Mehrkornbetonen aus Leichtzuschlägen	41
3.8 Untersuchungen an den Feinmörteln der Mehrkornbetone	41
3.9 Die Eigenschaften der verwendeten Zemente	42
3.10 Druckzylinderversuche an Leichtzuschlägen in Abhängigkeit von der Kornrohddichte	42
3.10.1 Versuchsdurchführung	43
3.10.2 Versuchsergebnisse	44
3.11 Druckzylinderversuche am Ausgangsmaterial	48
4. Theoretische Auswertung der Versuchsergebnisse	49
4.1 Zusammenhang zwischen Einkorn- u. Mehrkornbetondruck- festigkeit	49
4.2 Zusammenhang zwischen den E-Modulen von Einkorn- und Mehrkornbeton	55

	<u>Seite</u>
4.3 Der Zuschlagkennwert K als Grundlage zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Leichtbeton	58
5. Zusammenfassung	58
Literatur-Verzeichnis	61
Tabelle 1 bis 33	66 - 121
Abbildung 1 bis 45	122 - 154

Verwendete Abkürzungen

Beanspruchungsgrößen in kp/cm^2 bzw. kp

β_a	Zuschlagdruckfestigkeit
β_m	Mörteldruckfestigkeit
β_b	Zweistoffdruckfestigkeit (Einkornbeton) Betondruckfestigkeit
β_w	Würfeldruckfestigkeit
N	Zementnormendruckfestigkeit
σ	Spannung
K	Zuschlagkennwert
P	Belastung
E	Elastizitätsmodul

Beton und Zuschlag

Z	Zement
W	Wasser
NI	Normensand I
FS	Feinsand
NS	Natursand
NK	Naturkies
γ_s	Schüttdichte des Zuschlags
ρ	Kornrohichte
γ_b	Frischbetonrohichte
γ_m	Mörtelrohichte
V_g	Stoffraum des Einkornbetons
G_a	Zuschlaggewicht
G_g	Gewicht des Einkornbetons

v Volumenkonzentration des Zuschlags
n Teilvolumenkonzentration des Zuschlags

Geometrische Größen in cm

F Fläche
d Durchmesser
l Länge
h Höhe
e Kolbenverschiebung (Zusammendrückung des Zuschlaghaufwerks)
e/h Bezogene Zusammendrückung
V Volumen
x, y,
z Koordinaten

Indices

i, k, l Laufindices
r rechnerisch
exp experimentell

Statistik

s Standardabweichung
 \bar{v} Variationskoeffizient

1. Aufgabenstellung

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, daß auch der Leichtbeton im Brücken-, Hoch- und Fertigteilbau Anwendung finden kann. Voraussetzung ist die Wahl eines Leichtzuschlags ausreichender Kornfestigkeit und einer Mischungszusammensetzung, die auch unter Baustellenbedingungen die Herstellung eines Leichtbetons mit dichtem Mörtelgefüge ohne Entmischungen sicher gewährleistet.

Die Druckfestigkeit des Leichtbetons hängt entscheidend von der Kornfestigkeit des Zuschlags und der Druckfestigkeit des Mörtelgerüstes ab. Auch die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Zuschlag und Mörtelgerüst und die hierdurch verursachten Schubspannungen in den Berührungsflächen von Korn und Mörtel beeinflussen über die maximal aufnehmbaren Bindekräfte die Leichtbetondruckfestigkeit. Über den in Abhängigkeit von der Makrostruktur des Betongefüges auftretenden Kräfteverlauf unter äußerer Beanspruchung bestehen bis jetzt nur pauschale Vorstellungen [3]. Die sich bei einer rein theoretischen Betrachtungsweise beispielsweise mit Hilfe der Kontinuumsmechanik ergebenden Schwierigkeiten zwingen zu einer phänomenologischen Behandlung des anstehenden Problems.

Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen wurden mit folgender Zielsetzung durchgeführt:

- a) Bestimmung der Festigkeitseigenschaften des Zuschlags durch Versuche am Einzelkorn,
an der losen Kornschüttung getrennt nach Korngruppen,
an Einkornbetonen.
- b) Bestimmung der Verformungseigenschaften des Zuschlags durch Versuche am Einzelkorn,
an Einkornbetonen.
- c) Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Sieblinienbetonen aus Leichtzuschlägen.

- d) Theoretische Abklärung der Zusammenhänge zwischen den unter a) bzw. b) und c) gewonnenen Ergebnissen.
- e) Überprüfung, inwieweit sich die bei den vorstehenden Untersuchungen angewandten experimentellen Methoden als Prüfverfahren für die Qualitätskontrolle von Leichtzuschlägen eignen.

2. Voruntersuchungen

2.1 Umfang und Zielsetzung

Die Voruntersuchungen sollten in erster Linie einen Aufschluß über die Durchführbarkeit und Aussagefähigkeit bestimmter Versuchsmethoden und den Einfluß einzelner Parameter geben. Im einzelnen wurde folgenden Fragen nachgegangen:

- a) Können aus den Zuschlagkörnern Prüfkörper gewonnen werden, die eine unmittelbare Festigkeits- und Verformungsprüfung zulassen?
- b) Wie groß sind die Streuungen in den Versuchsergebnissen, die mit derartigen Prüfkörpern erhalten werden, und wodurch werden sie verursacht?
- c) Welchen Einfluß haben Mörtelfestigkeit, Zuschlaggrößtkorn und Leichtzuschlagvolumenkonzentration auf die Druckfestigkeit von Sieblinienbetonen?

Die Untersuchungen am Zuschlagkorn beschränkten sich auf die in Tafel 1 angegebenen Zuschläge und Korngruppen. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Zuschläge enthält Abschnitt 3.2.

Tafel 1: Zuschläge und Korngruppen für Einzelkornprüfung

Bezeichnung	Art	Korngruppe [mm]
Norlit	Blähschiefer	15 / 25
Berwilit	Blähschiefer	15 / 25
Leca	Blähton	15 / 20
Detoon	Blähton	5 / 12

Die Versuchsreihen der Sieblinienbetone gehen aus Tafel 2 hervor.
Für jedes Prüfalter wurden 3 Würfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt.
Im Alter von 28 Tagen wurden zusätzlich 4 Prismen 15 / 15 / 70 cm
zur Bestimmung der Prismenfestigkeit und des E-Moduls geprüft.

Tafel 2: Versuchsreihen der Sieblinienbetone

Bezeichnung	Leicht- zuschlag	Größtkorn [mm]	Volumen- konzentration v	Prüfalter (Tage)
N III 35 N III 36 N III 37	Norlit	15	0,5 0,6 0,7	3, 7, 28
N III 45 N III 46 N III 47	Norlit	25	0,5 0,6 0,7	
B III 35 B III 36 B III 37	Berwilit	15	0,5 0,6 0,7	
B III 45 B III 46 B III 47	Berwilit	25	0,5 0,6 0,7	
Mw 0 Zementmörtel	-	-	0,0	

2.2 Versuche am Leichtzuschlagkorn

Mit einer speziell dafür hergestellten Vorrichtung wurde der Versuch unternommen, aus den Zuschlagkörnern der größten Korngruppe verschiedener Zuschlagtypen gem. Tafel 1 prismatische Prüfkörper herauszuschleifen. Es zeigte sich hierbei, daß für den Detoon-Zuschlag das Abschleifen nicht durchführbar war. Aufgrund der Sprödigkeit des Materials zerplatzten die Zuschlagkörner ausnahmslos. Die übrigen Zuschlagtypen ließen sich unter erheblichem Zeitaufwand schleifen. Die an 7 Prüfkörpern des Zuschlags Norlit gewonnenen Prüfergebnisse sind in Tafel 3 zusammengestellt.

Tafel 3: Prüfergebnisse an prismatischen Zuschlagprüfkörpern aus Norlit

Nr.	Roh- dichte [g/cm ³]	Druck- festigk. [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Nr.	Roh- dichte [g/cm ³]	Druck- festigk. [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]
1	0,790	73,8	11300	5	0,985	180,0	-
2	0,750	123,9	11600	6	1,010	249,0	-
3	0,804	146,8	-	7	0,952	271,5	-
4	0,762	78,5	-				
Mittel	0,776	106,0	11500	Mittel	0,982	233,0	-
max. Abweichung		38 %		max. Abweichung		23 %	

Die Kantenabmessungen der Prüfkörper betrugen 8 bis 16 mm. Die Prüfergebnisse zeigten ungeachtet der großen Streuungen einen deutlichen Einfluß der Kornrohdichte. Zur Bestimmung des E-Moduls wurden 4 Käfermeßuhren (1 Skalenteil = 1/1000 mm) verwendet. Gemessen wurde die Verschiebung der lastübertragenden Prüfplatten. Von einer Fortführung dieser Versuchsreihe wurde aus folgenden Gründen abgesehen:

- a) Die Herstellung der Prüfkörper gestaltete sich sehr zeitaufwendig. Außerdem machte die Erzielung absolut planparalleler Druckflächen erhebliche Schwierigkeiten.

- b) In den meisten Fällen wiesen die kleinen Zuschlagprüfkörper Störungen durch große Einzelporen auf, die als eine der Hauptursachen für die Streuungen in den Versuchsergebnissen anzusehen sind. Hieraus folgt weiter, daß ein statistisch gesichertes Ergebnis nur über eine große Zahl von Einzelprüfungen gewonnen werden kann, so daß der unter a) angeführte Gesichtspunkt entscheidende Bedeutung erhält.
- c) Die Prüfung muß sich aus herstellungstechnischen Gründen auf Korngruppen > 15 mm beschränken, so daß eine Aussage über die kleineren Korngruppen auf diesem Wege nicht zu erhalten ist.
- d) Der Festigkeitseinfluß der beim Schleifen entfernten Kornaußenschale ist schwer abschätzbar, da eine echte Vergleichsprüfung am Korn nicht möglich ist.

2.3 Versuche an Sieblinienbetonen

Bei den mit Sieblinienbetonen durchgeführten Versuchsreihen wurden Zuschlagtyp, Größtkorndurchmesser und Zuschlagvolumenkonzentration entsprechend Tafel 2 variiert. Es wurde für sämtliche Mischungen eine gleichbleibende Zusammensetzung des Zementmörtels angestrebt (siehe Tafel 4). Der Zementmörtelgehalt wurde entsprechend der gewünschten Zuschlagvolumenkonzentration verändert. Mit der Versuchsreihe Mw 0 wurden die Eigenschaften des Zementmörtels untersucht. Um eine Veränderung der Zementmörtelzusammensetzung durch den Leichtzuschlag in vernachlässigbaren Grenzen zu halten, wurden sämtliche Leichtzuschläge für eine Mischung nach Korngruppen getrennt trocken abgewogen und in Säcken einer 7-tägigen Wasserlagerung unterworfen. Die nach der Wasserlagerung gemessene Gewichtserhöhung entsprach der Gesamtfeuchte des Zuschlags, die sich aus Kern- und Oberflächenwasser zusammensetzt. Wie in 3.2.2 angegeben, wurde für die einzelnen Zuschlagkorngruppen die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit vorweg bestimmt, so daß sich die Oberflächenfeuchte abschätzen ließ. Die so ermittelte Oberflächenfeuchte wurde bei der Wasserzugabe berücksichtigt. Wie sich bei den Versuchen herausstellte, können die

an kleineren Proben festgestellten Wasseraufnahmewerte gemessen am oberflächen trockenen Material nur einen relativ groben Anhalt bieten. Die für die Sieblinienbetone 7 Tage unter Wasser gelagerten Zuschläge zeigten eine erheblich geringere Wasseraufnahme. Bei derartigen Versuchen kann daher nicht darauf verzichtet werden, die tatsächliche Wasseraufnahme in jedem Einzelfall an den für die Betonversuche vorgesehenen Zuschlägen zu bestimmen.

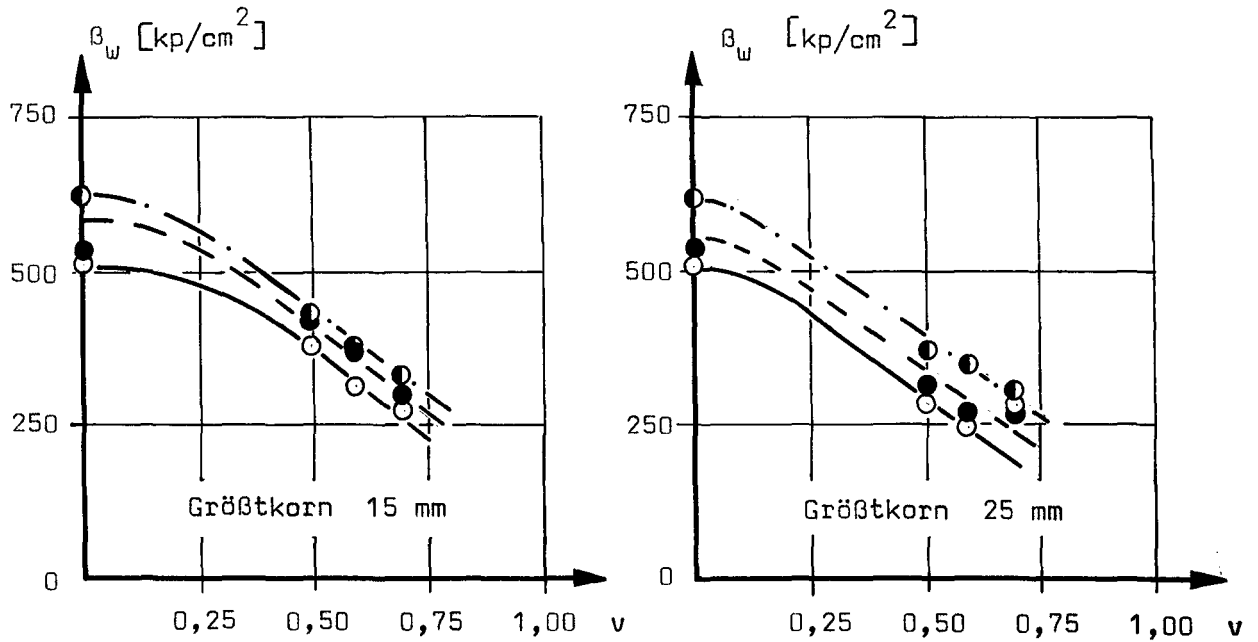
In Tafel 5 sind die gewählten Kornzusammensetzungen für die Leichtzuschläge in Abhängigkeit vom Größtkorn angegeben.

Tafel 4: Zusammensetzung des Zementmörtels Mw 0

Zement PZ 375 A [kg/m ³]	Quarzsand 0/0,2 mm [kg/m ³]	Wasser [l/m ³]	Mischungsverhältnis z : s : w
1300	325	454	1 : 0,25 : 0,35

Tafel 5: Kornzusammensetzung der Zuschläge

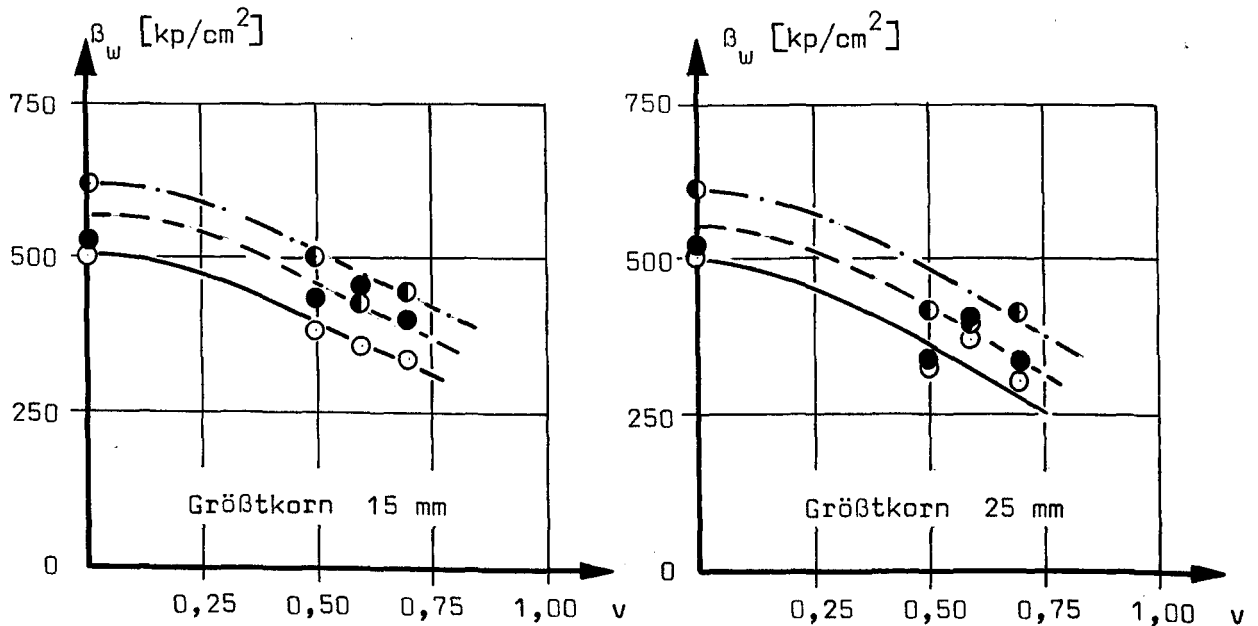
Korngruppe [mm]	Norlit			Berwilit		
	Kornroh- dichte [g/cm ³]	Größtkorn		Kornroh- dichte [g/cm ³]	Größtkorn	
		15 mm [Vol %]	25 mm [Vol %]		15 mm [Vol %]	25 mm [Vol %]
0 / 3	1,71	42	30	1,79	42	30
3 / 7	1,39	27	20	1,31	27	20
7/ 15	1,20	31	25	1,17	31	25
15/ 25	1,14	-	25	0,90	-	25



a)

Zuschlag: Berwilit

b)



c)

Zuschlag: Norlit

d)

- — 3 Tage
- --- 7 Tage
- ◐ -.-.- 28 Tage

Bild 1: Würfeldruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zuschlagvolumenkonzentration v

Die Mischungsanteile wurden gleichzeitig in den Zwangsmischer aufgegeben. Die Mischzeit betrug 2 Minuten. Anschließend wurde etwa die Hälfte der Mischung entnommen und verarbeitet. Vor Entnahme der Restmischung wurde diese noch einmal kurz durchgemischt. Die Verdichtung der Prüfkörper erfolgte auf einem Rütteltisch. Die Rüttelzeiten betrugen für die Würfel 20 sec und für die E-Modul-Prismen 30 sec.

Die Tabellen 1 bis 3 (siehe Anhang) enthalten eine vollständige Zusammenstellung der Versuchsergebnisse. In Bild 1 sind die Ergebnisse graphisch aufgetragen. Generell lassen die Versuche erkennen, daß sich die Würfeldruckfestigkeit mit zunehmender Zuschlagvolumenkonzentration deutlich verringert, wenngleich für die Mischungen mit einem Größtkorndurchmesser von 25 mm das Bild durch erhebliche Versuchsstreuungen beeinträchtigt wird. Das Auftreten von leichten Entmischungserscheinungen hängt besonders bei den Mischungen mit Größtkorn 25 mm von der Zuschlagvolumenkonzentration ab, so daß hiermit die relativ großen Streuungen zu erklären sind. Beispielsweise fällt auf, daß für den Zuschlag Norlit mit Größtkorn 25 mm die Würfeldruckfestigkeiten für eine Volumenkonzentration von $v = 0,5$ teilweise unter den entsprechenden Werten für $v = 0,6$ liegen. Wie ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Zuschlägen Norlit und Berwilit erkennen läßt, liegen die Druckfestigkeiten der Berwilitbetone um rund 10 % unter den entsprechenden Werten der Norlitbetone. Die geringere Kornfestigkeit des Berwilitzuschlags drückt sich auch in der gegenüber Norlit geringeren Kornrohdichte der einzelnen Korngruppen aus. Ebenfalls eine Festigkeitsabnahme von durchschnittlich 10 % ist bei einer Erhöhung des Größtkorns von 15 mm auf 25 mm zu verzeichnen.

Die E-Modul-Versuche, die ebenfalls in Tabelle 2 mit aufgeführt sind, lassen nur einen relativ geringen Einfluß der Volumenkonzentration des Zuschlags erkennen. Die Abweichungen zwischen dem E-Modul des reinen Zementmörtels und der E-Moduli der Leichtbetone liegen praktisch in der Größenordnung der Versuchsstreuungen.

2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die am Einzelkorn und an Sieblinienbetonen durchgeführten Versuchsreihen lassen den Einfluß der Kornrohdichte des Zuschlags auf die Kornfestigkeit und damit auf die Betondruckfestigkeit erkennen. Es ergab sich hieraus die Folgerung, dem Zusammenhang zwischen Kornrohdichte und der Festigkeit des Zuschlags bzw. des Betons gezielter nachzugehen, als es mit den Versuchsreihen der Voruntersuchungen möglich war. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, daß verwertbare Festigkeitsergebnisse über direkte Versuche am Einzelkorn nicht gewonnen werden können. Es blieb daher als Alternative nur der Weg, die Kornfestigkeit des Zuschlags mittelbar über die von ihr beeinflusste Druckfestigkeit des zugehörigen Leichtbetons nachzuweisen. Dieser Weg ist bei geeigneter Versuchsdurchführung grundsätzlich möglich und führt zu aussagefähigen Ergebnissen, wie die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Versuche beweisen.

Ein wesentlicher Nachteil, der unter 2.3 beschriebenen Versuche an Sieblinienbetonen ist darin zu sehen, daß sich mehrere verschiedene Einflußgrößen gleichzeitig auf die Ergebnisse auswirken und die gesuchten Zusammenhänge verwischen können. Wollte man dem Einfluß der möglichen Parameter mit derartigen Versuchen im einzelnen nachgehen, so wäre das nur mit einem großen versuchstechnischen Aufwand möglich geworden. Neben der Zementmörtelfestigkeit hätten Sieblinienzusammensetzung und insbesondere die Kornrohdichten der einzelnen enthaltenen Zuschlagkorngruppen variiert werden müssen. Eine weitere Schwierigkeit wäre in der Beschaffung ausreichender Zuschlagmengen mit unterschiedlicher Kornrohdichte für die einzelnen Korngruppen der verschiedenen Zuschlagtypen zu sehen gewesen. Diese Überlegungen führten zur Entscheidung, für die Hauptuntersuchungen Kleinversuche zu wählen. Da zwischen den beiden Blähschieferzuschlägen Norlit und Berwilit kein grundsätzlicher Unterschied festgestellt wurde, konnte der Berwilit aus den weiteren Untersuchungen ausgeklammert werden.

3. Hauptuntersuchungen

3.1 Versuchsprogramm

3.1.1 Einkornbetonversuche

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Versuche wurden mit der Zielsetzung durchgeführt, für einige charakteristische Zuschlagtypen eine grundlegende Klärung des Einflusses von Kornrohichte, Korngröße, Kornzusammensetzung und Mörteldruckfestigkeit auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul von Leichtbetonen herbeizuführen. Zu diesem Zweck wurden Einkornbetonversuche durchgeführt, deren Umfang aus Tafel 7 hervorgeht. Zielgrößen dieser Versuche waren Druckfestigkeit und E-Modul. Variiert wurden die als Haupteinflußgrößen erkannten Parameter:

- a) Zuschlagtyp
- b) Korngröße
- c) Kornrohichte
- d) Mörteldruckfestigkeit

In die Untersuchungen wurden 3 artverschiedene Leichtzuschlagtypen einbezogen: Blähschiefer Norlit sowie die Blähtone Leca und Detoon. Die Zuschläge entstammten ohne Ausnahme der laufenden Produktion folgender Werke:

- a) Norlit: Nordcement AG., Hannover, Werk Hoiersdorf
- b) Leca: Georg v. Giesche's Erben, Hamburg, Werk Rahden
- c) Detoon: Veit Dennert KG., Werk Heng

Zusätzlich wurden Vergleichsversuche mit Naturkies durchgeführt. Die Mörteldruckfestigkeiten wurden entsprechend Tafel 6 in 3 Stufen verändert.

Als Prüfkörper wurden Zylinder mit einem Durchmesser von $d = 50$ mm und einer Höhe von $h = 70$ mm gewählt. Bei den ersten Tastversuchen betrug die Höhe $h = 50$ mm. Zum Vergleich wurden auch einige Einkornbetonversuche mit 20 cm Würfeln durchgeführt. Parallel zu annähernd

jeder Prüfserie wurde an den entsprechenden Prüfkörpern der zugehörige Mörtel untersucht.

Tafel 6: Mörtel der Einkornbetone

Bezeichnung	M 1	M 2	M 3
angestrebte Mörteldruckfestigkeit β_m [kp/cm ²]	600	300	200
Prüfalter (Tage)	7	7	3

Aus der Zusammenstellung Tafel 7 ist zu erkennen, daß für die Einkornbetonversuche mit dem hochfesten Mörtel M 1 der gesamte mögliche Kornrohdbereich erfaßt wurde. Die Versuche mit den Mörteln M 2 und M 3 wurden demgegenüber nur auf einzelne Kornrohdbichten beschränkt.

3.1.2 Mehrkornbetonversuche

Die durch die Einkornbetonversuche ermittelten Festigkeits- und Verformungszusammenhänge sollten dazu dienen, die zu erwartende Druckfestigkeit von Mehrkornbetonen sowie ihren E-Modul mit Hilfe eines theoretischen Festigkeitsmodells in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung vorauszuberechnen. Zur Bestätigung dieser theoretischen Ableitungen wurden Mehrkornbetonversuche mit unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen durchgeführt. Hierbei wurde die Druckfestigkeit an 20 cm Würfeln und der E-Modul an Prismen 15 x 15 x 70 cm geprüft. Die bereits in den Voruntersuchungen gewonnenen Ergebnisse an Leichtbetonen mit Norlit-Zuschlag (siehe Tafel 2) wurden in diesem Zusammenhang ebenfalls mit herangezogen und in den entsprechenden Tabellen der Vollständigkeit halber noch einmal mit aufgeführt.

Tafel 7: Versuchsumfang der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Mörtel	Untersuchte Zuschlagkorngruppen [mm] der Kornrohdichten [g/cm ³]							
		0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6	Ausgangs- material
1. Prüfkörper: Zylinder d/h = 50/70 mm bzw. 50/50 mm									
Norlit	M 1	-	-	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7
		-	7-15	7-15	7-15	7-15	7-15	7-15	7-15
		-	15-25	15-25	15-25	15-25	15-25	-	15-25
	M 2	-	-	-	-	3-7	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	7-15	-
		-	-	15-25	-	-	-	-	-
	M 3	-	-	-	-	3-7	-	-	-
		-	-	7-15	-	-	-	7-15	-
		-	-	15-25	-	-	15-25	-	-
Leca	M 1	-	3-7	3-7	3-7	-	-	-	3-7
		7-15	7-15	7-15	7-15	-	-	-	7-15
		15-20	15-20	15-20	-	-	-	-	15-20
	M 2	-	-	3-7	-	-	-	-	-
		-	-	7-15	-	-	-	-	-
		-	15-20	-	-	-	-	-	-
	M 3	-	3-7	-	-	-	-	-	-
		-	-	7-15	-	-	-	-	-
		-	15-20	-	-	-	-	-	-
Detoon	M 1	-	-	-	2-5	2-5	2-5	-	2-5
		-	-	-	5-12	5-12	5-12	5-12	5-12
	M 2	-	-	-	-	-	2-5	-	-
		-	-	-	-	-	5-12	-	-
	M 3	-	-	-	-	-	2-5	-	-
		-	-	-	-	-	5-12	5-12	-
Natur- kies	M 1	-	-	-	-	-	-	-	3-7
		-	-	-	-	-	-	-	7-15
		-	-	-	-	-	-	-	15-30
2. Prüfkörper: Würfel mit 20 cm Kantenlänge									
Leca	M 1	-	7-15	-	-	-	-	-	-
		-	15-20	-	-	-	-	-	-
Detoon	M 1	-	-	-	-	5-12	-	-	-
Natur- kies		-	-	-	-	-	-	-	7-15
		-	-	-	-	-	-	-	15-30

Für die Mehrkornbetone wurde in Parallelversuchen die Druckfestigkeit des zugehörigen aus Zement, Quarzsand 0-0,2 mm, Leichtzuschlagkornggruppe ≤ 3 mm und Wasser bestehenden Mörtelgerüstes bestimmt. Tafel 8 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Mehrkornbetonversuche.

Tafel 8: Mehrkornbetonversuche

Bezeichnung	Zement	Schwerzuschlag Korngruppen [mm]		Leichtzuschlag				
				Bezeichnung	Korngruppen [mm]			
N I	PZ 275 A	0-0,2	-	Norlit	0-3	3-7	7-15	15-25
N II	HOZ 275 W	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	15-25
N III 35-37	PZ 375 A	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	-
N III 45-47	PZ 375 A	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	15-25
N IV	HOZ 275 T	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	15-25
N V	PZ 275 A	-	0-3	"	-	3-7	7-15	15-25
N VI	PZ 275 A	0-0,2	15-30	"	0-3	3-7	7-15	-
L I	PZ 275 A	0-0,2	-	Leca	0-3	3-7	7-15	-
L II	PZ 275 H	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	15-20
L III	HOZ 275 S	0-0,2	-	"	0-3	3-7	7-15	15-20
D I	PZ 375 A	0-0,2	-	Detoon	0-2	2-5	5-12	-
D II	PZ 375 A	0-0,2	0-3	"	0-2	2-5	5-12	-

3.1.3 Druckzylinderversuche

Die Bemühungen, am Einzelkorn von Leichtzuschlägen Festigkeit und E-Modul zu bestimmen, haben zu keinem praktikablen Ergebnis geführt. Es wurden daher in Anlehnung an das in den russischen Normen [23,25] verankerte Zuschlagprüfverfahren Druckzylinderversuche am Zuschlaghaufwerk durchgeführt. Im Vordergrund dieser Versuche stand die

Frage, inwieweit eine derartige Prüfmethode zu Ergebnissen führt, die als echte Kriterien für die Festigkeit des Zuschlags angesehen werden können und einen Rückschluß auf die zu erwartende Leichtbetondruckfestigkeit zulassen. Dem Versuchsziel entsprechend wurden daher in Übereinstimmung mit den Einkornbetonversuchen folgende Parameter variiert:

- a) Zuschlagtyp
- b) Korngröße
- c) Kornrohddichte.

Tafel 9 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Druckzylinderversuche.

Tafel 9: Druckzylinderversuche an Leichtzuschlägen

Zuschlag	Untersuchte Zuschlagkorngruppen der Kornrohddichten [g/cm ³]						
	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	>1,6	Ausgangsmaterial
Norlit	-	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7
	-	7-15	7-15	7-15	7-15	7-15	7-15
	-	15-25	15-25	15-25	15-25	-	15-25
Leca	3-7	3-7	3-7	-	-	-	3-7
	7-15	7-15	-	-	-	-	7-15
	15-20	15-20	-	-	-	-	15-20
Detoon	-	-	2-5	2-5	2-5	-	2-5
	-	-	5-12	5-12	5-12	5-12	5-12

3.2 Eigenschaften der verwendeten Leichtzuschläge

Die von den einzelnen Herstellerwerken bezogenen Leichtzuschläge (Ausgangsmaterial) wurden in Stichproben auf Kornrohdichte, Schüttdichte, Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit und Kornzusammensetzung geprüft. Wie bereits in 3.1 ausgeführt, wurden die Untersuchungen auf die folgenden 3 als charakteristisch anzusehenden künstlichen Leichtzuschlagtypen mit geschlossener Oberfläche beschränkt:

- a) Norlit: Die Herstellung dieses Blähschieferzuschlags erfolgte im Drehrohrofen. Die Kornform ist gedrunken und eckig. Die Oberfläche ist relativ geschlossen und weist aufgrund des schiefrigen Rohmaterials häufig eine deutliche Furchung auf. Die Farbe ist braungrau. Der Anteil an gebrochenem Korn ist auch für die kleinste Korngruppe gering. Der Zuschlag wird in den Korngruppen 0-3, 3-7, 7-15, 15-25 mm geliefert.
- b) Leca: Dieser im Drehrohrofen hergestellte Blähtonzuschlag besitzt eine unregelmäßig runde Kornform mit glatter, geschlossener Oberfläche. Zu einem sehr geringen Anteil werden auch Körner mit schlackenartiger, offenporiger Struktur angetroffen. Mit abnehmendem Korndurchmesser steigt der Anteil an gebrochenem Korn. Die Farbe der Körner ist braun. Die hergestellten Korngruppen lauten 0-3, 3-7, 7-15, 15-20 mm.
- c) Detoon: Beim Detoon handelt es sich ebenfalls um ein Blähtonmaterial. Die Herstellung erfolgt nach dem sog. Zirkulationsströmungsverfahren. Die runden Zuschlagkörner weisen eine harte, etwas rauhe, aber relativ geschlossene Oberfläche auf. Die kleinste Korngruppe besteht aus gebrochenem Korn. Für die übrigen Korngruppen ist der Anteil an gebrochenem Korn gering. Die Farbe ist braun. Es werden die Korngruppen 0-2, 2-5, 5-12 mm hergestellt.

3.2.1 Kornrohdichte und Schüttdichte

Die Kornrohdichte wurde für Norlit und Detoon nach dem Auftriebsverfahren und vergleichsweise auch nach dem Flüssigkeitsverdrängungsverfahren bestimmt. In beiden Fällen erfolgte die Versuchsdurchführung

in Übereinstimmung mit DIN 52102. Nach beiden Verfahren wurden Ergebnisse erhalten, die nur wenig voneinander abweichen. Die Kornrohdichte für Leca wurde nach DIN 4226 E geprüft. Wie Vergleichsversuche am Zuschlag Detoon zeigten, ergab DIN 4226 E gegenüber DIN 52102 nur für die Korngruppe 0-2 mm ins Gewicht fallende Abweichungen. In Tabelle 4 sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt worden.

Die Schüttdichte der Zuschläge wurde für den lose eingelaufenen und den eingerüttelten Zustand in Übereinstimmung mit DIN 52110 ermittelt. Tabelle 5 enthält die Versuchsergebnisse.

Die Versuche zeigen insgesamt, daß sich Kornrohdichte und Schüttdichte mit zunehmender Korngröße verringern.

3.2.2 Wassersaugfähigkeit der Leichtzuschläge

Auch Leichtzuschläge mit augenscheinlich geschlossener Kornoberfläche weisen im allgemeinen eine poröse Außenschale auf. Neben dem im Kern des Zuschlagkorns vorhandenen Totporenvolumen, das von außen nicht zugänglich ist, steht somit ein je nach Zuschlagtyp unterschiedlich großes offenes Porenvolumen zur Wasseraufnahme zur Verfügung. Leichtzuschläge zeigen daher auch das Bestreben, Wasser aufzusaugen. Die Saugfähigkeit ist im allgemeinen in den ersten 30 bis 60 Minuten am stärksten. Bei Wasserlagerung unter normalem Atmosphärendruck ist die Wasseraufnahme in den meisten Fällen auch nach 28 Tagen noch nicht abgeschlossen. Durch das starke Anfangssaugen der Zuschläge wird dem Mörtel ein Teil des Anmachwassers entzogen, gleichzeitig aber wächst der Zementmörtel in einem gewissen Maße in die offenen Poren hinein, so daß eine stärkere Verzahnung zwischen Mörtel und Korn entstehen kann. Der Wasserentzug im Mörtel führt zu einer Veränderung des wirksamen w/z -Faktors, die mit Hilfe des Wasseraufnahmewertes nach 30 Minuten nur in ihrer Größenordnung abgeschätzt werden kann. Da die Entwicklung exakter Meßmethoden bisher nicht gelungen ist, bleibt eine Aussage über die Mörteldruckfestigkeit stets mit gewissen Unsicherheiten behaftet.

Für die Zuschläge Norlit, Leca und Detoon wurde die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck gemäß DIN 52103 in Abhängigkeit von der Zeit

der Wasserlagerung durchgeführt. In Abb. 1 (Anhang) sind die gefundenen Ergebnisse graphisch dargestellt. Eine Zusammenstellung sämtlicher Einzelergebnisse kann Tabelle 6 entnommen werden. Zusätzlich wurde für Norlit der Korngruppen > 3 mm ebenfalls nach DIN 52103 der Sättigungswassergehalt unter einem Druck von 150 kp/cm^2 bestimmt. In Tabelle 7 sind die Versuchsergebnisse angegeben. Es zeigte sich, daß bei normaler Wasserlagerung auch nach 68 Tagen der Sättigungswassergehalt noch nicht voll erreicht worden war.

3.2.3 Siebanalyse für das Ausgangsmaterial

An dem Ausgangsmaterial wurde für jede Korngruppe der Anteil von Über- und Unterkorn durch Siebanalysen festgestellt. Zusätzlich zu den Rundlochsieben wurden hierbei für einige Zwischenkorngrößen auch Quadratlochsiebe verwendet. Die Ergebnisse der Siebanalysen sind in Tabelle 8 zusammengefaßt worden.

3.2.4 Trennung der Leichtzuschläge nach Kornrohdkichteklassen

Als eine der wichtigsten Einflußgrößen wurde in dieser Forschungsarbeit die Zuschlagkornrohdkichte angesehen. Um für die drei ausgewählten Zuschlagtypen entsprechendes Versuchsmaterial zu beschaffen, mußte das Ausgangsmaterial in die für jede Korngruppe möglichen Kornrohdkichten aufgeteilt werden. Ausgenommen wurden hiervon allerdings die Korngruppen < 3 mm. Die Trennung der Zuschläge erfolgte mit Hilfe der in Tafel 10 angegebenen Flüssigkeiten definierter Dichte. Das Verfahren beruhte auf dem einfachen Prinzip, daß sich die Zuschlagkörner, die eine geringere Dichte aufweisen als die Trennflüssigkeit, durch Aufschwimmen absondern.

Nach jedem Durchgang durch eine bestimmte Trennflüssigkeit wurden die Zuschläge durch Trocknen an der Luft von den geringfügig aufgesaugten, relativ flüchtigen Flüssigkeitsmengen befreit. Diese Methode erlaubte eine Einteilung der Zuschläge in bestimmte Kornrohdkichteklassen. Wie zu erwarten, war die Zuschlagausbeute für die Kornrohdkichteklassen

am größten, die in der Größenordnung der mittleren Kornrohddichte des Ausgangsmaterials lagen. Nach oben und nach unten nahm die Zuschlagsausbeute teilweise stark ab. Bevor die Zuschläge für Betonversuche weiterverwendet wurden, erfolgte eine 24-stündige Lagerung im Trockenschrank bei einer Temperatur von 105° C. Auf diese Weise wurde gesichert, daß auch die letzten Reste der verwendeten Trennmittel entfernt waren.

Tafel 10: Trennflüssigkeiten

Kornrohddichte- klasse [g/cm ³]	< 0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	> 1,6
Trennflüssig- keit	n-Pentan	Aceton	Gemische aus Xylol (0,860) Tetrachlor- kohlenstoff			Tetrachlor- kohlenstoff	
Dichte der Trennflüssigk. [g/cm ³]	0,62	0,792	1,0	1,2	1,4	1,595	

3.2.5 Siebanalysen der Zuschläge der einzelnen Kornrohddichteklassen

Durch umfangreiche Siebanalysen wurde für jede Zuschlagkorngruppe die Kornzusammensetzung in Abhängigkeit von der Kornrohddichteklasse überprüft. In den Fällen, wo sich innerhalb einer Zuschlagkorngruppe je nach Kornrohddichteklasse extreme Unterschiede in der Kornzusammensetzung ergaben, wurden zu stark vertretene Korngrößen in ihrem Anteil reduziert. Eine völlige Angleichung in der Kornzusammensetzung innerhalb einer Zuschlagkorngruppe konnte jedoch nicht immer erreicht werden. In den Abb. 2 bis 5 sind die bereits korrigierten Kornzusammensetzungen in Abhängigkeit von der mittleren Kornrohddichte für die Zuschläge, wie sie bei allen weiteren Untersuchungen Verwendung fanden, aufgetragen.

3.3 Untersuchungen an Einkornbetonen in Abhängigkeit von der Zuschlag- kornrohdichte und Mörteldruckfestigkeit

3.3.1 Versuchsdurchführung

Bei der Wahl einer geeigneten Prüfkörperform und -größe mußte in erster Linie auf 2 Dinge Rücksicht genommen werden, ohne hierdurch die Aussagefähigkeit der Prüfergebnisse wesentlich zu beeinträchtigen. Die Trennung der Leichtzuschläge nach Kornrohdichteklassen war mit einem ganz erheblichen Arbeitsaufwand verbunden. Die zur Verfügung stehenden Zuschlagmengen waren daher infolge geringer Ausbeute für einige spezielle Kornrohdichteklassen von vornherein sehr begrenzt. Es sollten weiter mit den Zuschlägen Einkornbetonprüfkörper hergestellt werden. Hierbei waren die Forderungen nach optimaler Zuschlagvolumenkonzentration und gleichzeitig dichtem Mörtelgefüge zu erfüllen. Es wurden eingehende Voruntersuchungen an scheiben- und würfelförmigen sowie zylindrischen Prüfkörpern im Hinblick auf ein geeignetes Herstellungsverfahren durchgeführt. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden für alle weiteren Einkornbetonversuche zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von $d = 5$ cm und einer Höhe $h = 7$ cm gewählt. Die in den Voruntersuchungen verwendeten zylindrischen Prüfkörper wiesen eine Höhe von $h = 5$ cm auf. Ihre Ergebnisse wurden bei der Gesamtauswertung mit herangezogen. Für die Prüfung von Beton und betonähnlicher Stoffe gilt im allgemeinen die Forderung, daß die kleinste Prüfkörperabmessung mindestens das 5-fache des in der Mischung enthaltenen größten Zuschlagdurchmessers betragen soll. Diese Bedingung wurde mit den gewählten Prüfkörpern annähernd bis zur Korngruppe 7/15 mm erfüllt. Daß der Prüfkörpergröße für die in dieser Arbeit vorgesehenen Untersuchungen kein entscheidender Einfluß einzuräumen ist, dafür sprechen nachfolgende Argumente:

- a) Die zylindrischen Prüfkörper wurden nur für Versuche an Einkornbetonen benutzt. Die in den Mörtel eingebetteten Zuschlagpartikel entstammten hierbei mit Ausnahme der am Ausgangsmaterial durchgeführten Experimente stets einer eng begrenzten Kornrohdichteklasse. Damit war bezüglich Korngröße und Korneigenschaften ein hohes Maß

an Gleichmäßigkeit gegeben. Durch das gewählte Herstellungsverfahren wurde zusätzlich auch ein gleichförmiges Einkornbetongefüge gewährleistet. Die Forderung nach größeren Prüfkörperabmessungen zur Erzielung einer statistisch gleichmäßigen Verteilung der Korngrößen bzw. der Korneigenschaften im Gefüge war damit entkräftet.

- b) Im allgemeinen ist der Elastizitätsmodul der Leichtzuschläge geringer bzw. nur unwesentlich größer als der des umgebenden Mörtelgerüstes. Hinzu kommt, daß infolge der bereits erwähnten Verzahnung zwischen Zuschlag und Mörtel der Bruch auch bei geringen Mörtelfestigkeiten noch Überwiegend durch das Zuschlagkorn verläuft, so daß bis zum Bruch ein Zusammenwirken von Zuschlag und Mörtel in den meisten Fällen gegeben ist. Eine Abminderung der Bruchfestigkeit durch Keilwirkung, wie sie infolge dicht gelagerter sehr steifer Einschlüsse wie beispielsweise Naturkies auftritt, wenn der Prüfkörperdurchmesser im Verhältnis zum Korndurchmesser zu klein gewählt wird, war aus diesem Grund nicht zu befürchten.

Als Betonformen wurden, wie in Bild 2 dargestellt, längsgeschlitzte Kunststoffrohre verwendet. Mittels einer Schelle wurde der Mantelschlitz zusammengedrückt. Zum Ausschalen wurde die Schelle gelöst, so daß der Prüfkörper ohne Mühe aus der eingeölte Schalung herausgedrückt werden konnte. Die Mantelform selbst wurde in eine passend ausgedrehte Kunststoffplatte gestellt, die sich zum Ausschalen relativ leicht entfernen ließ.

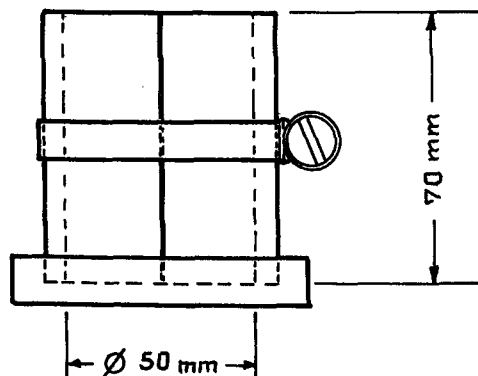


Bild 2: Kunststoffform für Einkornbetonprüfkörper

Die Einkornbetonprüfkörper wurden nach folgendem Verfahren hergestellt. Zunächst wurde der Zementmörtel in ausreichender Menge vorgemischt. Anschließend wurden die Formen schichtweise mit Zementmörtel und Zuschlag gefüllt. Jede eingefüllte Zuschlagschicht wurde durch Rütteln unter gleichzeitigem Druck mittels eines Stampfers in eine möglichst dichte Lagerung gebracht, bevor die nächste Mörtelschicht eingefüllt wurde. Das Einrütteln der Zuschläge erfolgte, indem mit der Schalung in regelmäßigem Rhythmus leicht auf eine feste Unterlage geklopft wurde. Die Anzahl der erforderlichen Schichten richtete sich im wesentlichen nach der Korngröße der einzubringenden Zuschlagpartikel. Je kleiner das Zuschlagkorn, umso mehr Schichten wurden erforderlich. Mörtel- und Zuschlagmenge für die einzelnen Schichten wurden nach Augenschein aufeinander abgestimmt. Für jeden Prüfkörper - ausgenommen die der Voruntersuchungen - wurde das Gewicht der eingefüllten Zuschlagmenge bestimmt. Zur Bestimmung der zugehörigen Mörteldruckfestigkeit wurden gleichzeitig reine Mörtelzylinder hergestellt. Der Mörtel wurde in 2 Lagen eingefüllt. Jede Lage wurde durch Stochern verdichtet.

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung abgeglichen, gewogen und ca. 24 Stunden im Feuchtkasten bis zur Ausschalung gelagert. Die ausgeschalteten Prüfkörper wurden wiederum gewogen und bis zur Prüfung in einem Feuchtraum bei 20°C und etwa 95 % relativer Luftfeuchtigkeit abgedeckt unter einer Folie aufbewahrt. Die ersten Prüfkörper wurden vor der Prüfung mit Mörtel abgeglichen. Mit Rücksicht auf die E-Modulprüfung wurde jedoch dazu übergegangen, die Prüfkörper grundsätzlich abzuschleifen. Das Prüfalter betrug je nach Zementmörtel 3 bzw. 7 Tage, vgl. hierzu auch Tafel 6.

Im Regelfall wurden 5 bis 6 Prüfkörper in einer Serie für die Druckfestigkeitsprüfung und 2 Prüfkörper für die E-Modulprüfung hergestellt. Die zugehörige Mörteldruckfestigkeit wurde im allgemeinen an 3 Prüfkörpern ermittelt. Die Bestimmung des E-Moduls des Mörtels erfolgte stichprobenartig an einzelnen Prüfkörpern aus verschiedenen Prüfserien.

Bei der Prüfung der Druckfestigkeit β_b wurde die Belastung langsam und stetig bis zum Bruch gesteigert. Der E-Modul wurde nach folgendem Prüfverfahren bestimmt:

- a) Aufbringen einer Vorlast von 0,05-facher Bruchlast β_b .
- b) Belastung in Laststufen von $0,1 \cdot \beta_b$ bis zur Belastungshöhe von etwa $0,33 \cdot \beta_b$ und Messen der zu jeder Laststufe gehörenden Verformung.
- c) Entlastung auf Vorlast und Messen der Verformung, anschließend achtmaliges Belasten auf $0,33 \beta_b$ und Entlasten auf Vorlast.
- d) Belasten auf $0,33 \beta_b$, Messen der Verformung, Entlasten auf Vorlast und Steigerung der Last in Stufen von $0,1 \beta_b$ mit Messen der zugehörigen Verformung bis auf etwa $0,6 \beta_b$, anschließend kontinuierliche Laststeigerung bis zum Bruch. Bei einigen Prüfkörpern wurde auf die Bestimmung der Bruchlast verzichtet.

Für ein Lastspiel, das sich aus Lastaufbringung und Ablesung der Verformungen zusammensetzte, wurden etwa 2 Minuten benötigt.

Der E-Modul wurde als Sekantenmodul aus den unter d) gewonnenen Meßergebnissen errechnet. Die Verformungen wurden mit 4 Käfermeßuhren gemessen. Die Ablesegenauigkeit betrug bei 2 Uhren 1 Skalenteil = $1/1000$ mm und bei den beiden übrigen Uhren 1 Skalenteil = $1/100$ mm

3.3.2 Versuchsergebnisse

3.3.2.1 Druckfestigkeit und E-Modul des Mörtels

Die Eigenschaften der für die Einkornbetonversuche verwendeten Mörtel wurden laufend überprüft. Sämtliche Einzelergebnisse sind in den Tabellen 24 bis 28 zusammengestellt. Die Zuordnung der Mörtelversuchsergebnisse zu den zugehörigen Einkornbetonversuchen ist aus den Tabellen 9 bis 23 zu entnehmen. Die große Zahl der an den Mörteln durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen gestattete eine statistische

Auswertung, deren Ergebnisse im Zusammenhang mit den Angaben über die Zusammensetzung der Mörtel in Tafel 11 aufgeführt sind.

Tafel 11: Zusammensetzung und statistische Auswertung der Versuchsergebnisse der für die Einkornbetonversuche verwendeten Zementmörtel. Prüfkörper: Zylinder d/h = 50/70 mm

Bezeichnung	M 1	M 2	M 3	M 4
Zement	PZ 375 A	HOZ 275 W	PZ 275 H	HOZ 275 T
Zementnormendruckfestigk. N_{28} [kp/cm ²]	563	386	423	306
Mörtelzusammensetzung in Gew.-Teilen Z:FS:NI:W	1:0,35: 0,0:0,40	1:0,54: 0,456:0,54	1:0,538: 0,456: 0,615	1:0,0:0,40: 0,50
Rohdichte des Frischmörtels γ_m [g/cm ³]	2,120	2,120	2,070	1,970
W/Z unter Berücks. d. W-Verlusts inf. Bluten	0,38	0,48	0,52	--
Prüfalter (Tage)	7	7	3	3 7 28
Anzahl d. Versuche	85	21	23	3 3 3
Druckfestigkeit (Mittelwert) β_m [kp/cm ²]	585	265	215	115 194 254
Standardabweichung s [kp/cm ²]	54,7	22,7	16,5	--
Variationskoeffizient \bar{v} %	9,4	8,5	7,6	--
5 % - Fraktile $\beta_{m,5\%}$ [kp/cm ²]	492	229	191	--
E-Modul (Mittelwert) [kp/cm ²]	172000	106000	99000	--
max Abweichungen vom Mittel [%]	+ 12 - 14	+ 13 - 16	+ 11 - 17	--
Anzahl der E-Modulversuche	10	6	9	--

Die Steuerung der Zementmörteldruckfestigkeit allein über den Wasserversatz war durch die Gefahr eines verstärkten Blutens des Frischmörtels und des Aufschwimmens der Zuschlagkörner in den zugehörigen Einkornbetonen begrenzt. Die Mörteldruckfestigkeit wurde daher zusätzlich über die Veränderung der Mischungszusammensetzung und der Zementnormendruckfestigkeit angestrebt. Ein Aufschwimmen der Zuschlagkörner und eine damit zusammenhängende Verringerung der Lagerungsdichte der eingebetteten Zuschlagpartikel in den Einkornbetonversuchskörpern wurde bei den gewählten Mörtelkonsistenzen nicht beobachtet. Der Wasserverlust des Frischmörtels war ebenfalls gering. Er betrug im Mittel etwa 0,5 bis 1,0 Gew. % bezogen auf das Frischmörtelgewicht. Die infolge Bluten hervorgerufene Veränderung des w/z-Werts ist in Tafel 11 angegeben.

Man erkennt aus der statistischen Auswertung eine Zunahme der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten mit steigender Mörteldruckfestigkeit. Für die Auswertung der zugehörigen Einkornbetonversuche ergab sich aufgrund der Streuungen die Frage, ob jeder einzelnen Einkornbetonversuchsserie die Mörteldruckfestigkeit der zugehörigen Mörtelserie oder generell der Mittelwert aus der Gesamtheit aller Mörtelversuche als Bezugsgröße zuzuordnen ist. Ein Vergleich zwischen den Versuchsserien N 1.11 und N 1.12 bzw. N 1.16 und N 1.17 der Tabelle 19 macht beispielsweise deutlich, daß die Druckfestigkeit der zugehörigen Mörtelversuche nicht immer eindeutig auch die Druckfestigkeit des in den Einkornbetonprüfkörpern enthaltenen Mörtelgerüsts widerspiegelt. In den hier angegebenen Fällen ergaben sich trotz höherer Mörteldruckfestigkeit geringere Einkornbetondruckfestigkeiten. Diese Versuchsstreuungen, die auch bei der angewandten Sorgfalt nicht ausgeschaltet werden konnten, ließen es sinnvoll erscheinen, als Bezugsgröße ohne Ausnahme den Mittelwert der Mörteldruckfestigkeit entsprechend Tafel 11 zu wählen. Die Wahrscheinlichkeit, über diesen Mittelwert die Druckfestigkeit des Mörtelgerüsts der Einkornbetonkörper in der richtigen Größenordnung zu erfassen, ist größer, als wenn die Mörteldruckfestigkeit jeder einzelnen zugehörigen Mörtelserie zugrunde gelegt wird.

Aus Tafel 11 läßt sich entnehmen, daß die E-Modulergebnisse relativ große Streuungen aufweisen. Die E-Moduln steigen entsprechend der

Druckfestigkeit der zugehörigen Mörtel an. In Bild 3 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Die gemessenen E-Moduln entsprechen den für verschiedene Zementmörtel in [28] berichteten Werten.

Für den Mörtel M 1 wurden zum Vergleich auch Würfel mit 20 cm Kantenlänge und Prismen 10/10/55 cm hergestellt und geprüft. Entsprechend Tabelle 25 ergab sich für die Würfel Druckfestigkeit ein Gesamtmittel von $\beta_{w,7} = 440 \text{ kp/cm}^2$. Der für die zylindrischen Prüfkörper gefundene Mittelwert liegt gem. Tafel 11 um 35 % höher.

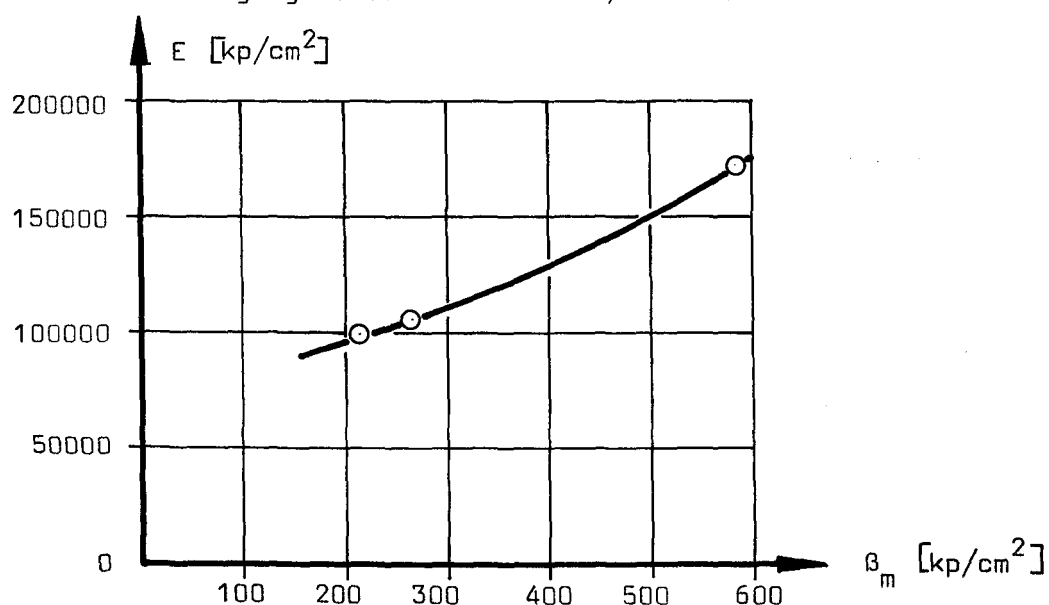


Bild 3: E-Modul der Zementmörtel in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit

Wie sich an der Prismenfestigkeit von 508 kp/cm^2 ablesen läßt, sind die Würfel Druckfestigkeiten allerdings etwas ungünstig ausgefallen, so daß der Festigkeitsabfall von 35 % mit Sicherheit zu hoch ist. Das E-Modulergesamt bestätigt mit $E = 190000 \text{ kp/cm}^2$ in etwa die an den Zylindern gefundenen Meßwerte.

Im Vergleich zu Schwerbetonen gleicher Festigkeit, weist beispielsweise der E-Modul des Mörtels M 1 einen sehr niedrigen Wert auf. Er liegt damit etwa in der Größenordnung eines E-Moduls für Berwilit-

oder Norlit-Leichtbeton der Güte LB 300. Diese Tatsache bestätigt die Vermutung annähernd gleicher elastischer Eigenschaften von Mörtel und hochfester Leichtzuschläge und eines idealen Zusammenwirkens von Mörtelgerüst und Zuschlag.

3.3.2.2 Druckfestigkeit von Einkornbetonen in Abhängigkeit von der Kornroh- dichte bei konstanter Mörteldruckfestigkeit

Wie aus Tafel 6 und 7 hervorgeht, wurde die Mörteldruckfestigkeit in 3 Stufen verändert. Bekanntlich ist der Leimporengehalt eine wesentliche Einflußgröße für die Mörteldruckfestigkeit. Da Leimporengehalt und w/z-Wert in einem direkten Verhältnis zueinander stehen, ergaben sich im Zusammenhang mit der Beurteilung der Versuchsergebnisse 2 wichtige Fragen:

- a) In welcher Größenordnung liegt der wirksame w/z-Wert?
- b) Weicht der w/z-Wert für die reinen Mörtelprüfkörper entsprechend Tafel 11 wesentlich von dem wirksamen w/z-Wert der Einkornbetonprüfkörper ab?

Die Bestimmung des wirksamen w/z-Wertes wurde über nachfolgende Feststoffrechnung durchgeführt. Das Mörtelgewicht G_m der Einkornbetonprüfkörper wurde aus der Differenz der gemessenen Gewichte von Zuschlagfüllung G_a und Gesamtkörper G_b im Alter von 24 Stunden ermittelt. Zur Bestimmung der benötigten Frischmörtelrohdichte γ_m wurden Frischgewicht und das an den 24 Stunden alten Mörtelprüfkörpern festgestellte Volumen herangezogen, das durch den Schrumpfprozeß des abbindenden Mörtels geringfügig von dem tatsächlichen Mörtelvolumen abweicht. Der wirksame w/z-Wert ergab sich nach Gleichung (1):

$$(w/z)_{\text{wirks}} = \frac{\sum}{\gamma_m} - \frac{1}{3,1} - \frac{FS + NI}{Z} \cdot \frac{1}{2,635} \quad (1)$$

$$\text{mit } \sum = 1 + \frac{FS + NI}{Z} + \frac{w}{Z}$$

Reindichte Zement $\gamma_z = 3,100 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Reindichte Sand $\gamma_s = 2,635 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

FS, NI Quarzsand, Normensand I

Wie aus Gleichung (1) zu erkennen ist, verursacht eine zu groß ermittelte Mörtelrohichte einen zu kleinen w/z-Wert. Die nach Gleichung (1) gefundenen wirksamen w/z-Werte sind als Mittelwerte in Tafel 12 zusammengestellt worden. Es zeigte sich, daß die Unterschiede zwischen den w/z-Werten der reinen Mörtel und der Einkornbetone aufgrund dieser Abschätzung relativ gering sind. Die Erscheinung des Mörtelblutens wurde bei den Einkornbetonen durch das Wassersaugen der Zuschläge annähernd aufgehoben. Dieses Ergebnis berechtigt daher zu dem Schluß, daß die gemessene Mörteldruckfestigkeit im Mittel annähernd die Druckfestigkeit des im Einkornbeton enthaltenen Mörtelgerüsts wiedergibt.

Tafel 12: Wirksamer w/z-Wert nach Gleichung (1) für die Einkornbetone

Mörtel		M 1	M 2	M 3
w/z für Mörtel unter Berücksichtigung des W-Verlusts inf. Bluten		0,38	0,48	0,52
wirks. w/z-Wert für Einkornbetone aus	Norlit	0,36	0,46	0,51
	Leca	0,35	0,46	0,51
	Detoon	0,35	0,45	0,51

Die im Zusammenhang mit den einzelnen Serien gemessenen Mörteldruckfestigkeiten sind infolge der unvermeidbaren Streuungen in ihrer Zuordnung zu den Einkornbetondruckfestigkeiten jedoch als Zufallsergebnisse zu werten. Das wird deutlich, wenn man die Serien N 1.11

und N 1.12 miteinander vergleicht. Trotz geringerer Mörteldruckfestigkeit ergab N 1.12 eine größere Druckfestigkeit als N 1.11. Die gleiche Feststellung gilt beispielsweise für die Serien N 1.16 und N 1.17, N 3.7 und N 3.8 sowie L 1.1 und L 1.2. Diese Beobachtung führte dazu, sämtlichen Versuchen einer Mörtelstufe den aus allen Mörtelergebnissen gewonnenen Mittelwert der Mörteldruckfestigkeit gemäß Tafel 11 zuzuordnen. Auf eine Korrektur der Einkornbetondruckfestigkeit unter Verwendung der gemessenen Mörteldruckfestigkeiten zugehöriger Einzelserien wurde verzichtet, da sie nach den vorstehenden Ausführungen nur einen willkürlichen Eingriff in die Versuchsergebnisse bedeutet hätte. In den Tabellen 9 bis 23 sind die zugehörigen Mörtelserien der Vollständigkeit halber mit aufgenommen worden. Was hier über die Druckfestigkeit gesagt ist, gilt sinngemäß auch für die E-Moduln der Mörtel.

Die untersuchten Zuschläge waren durch das in 3.2.4 beschriebene Verfahren in Kornrohdkichteklassen aufgeteilt worden. Für die Beurteilung der Versuchsergebnisse wurde jedoch eine genauere Kenntnis der Kornrohdkichten angestrebt. Mit Hilfe der bereits im Zusammenhang mit Gleichung (1) beschriebenen Maßdaten konnten Kornrohdkichte und Volumenkonzentration gemäß Gl. (2) und (3) errechnet werden.

$$\rho_r = \frac{G_a}{V_g - \frac{G_g - G_a}{\gamma_m}} \quad (2)$$

$$v = 1 - \frac{G_g - G_a}{\gamma_m \cdot V_g} \quad (3)$$

Die berechneten Kornrohdkichten und Volumenkonzentrationen sind in den Tabellen 9 bis 23 aufgeführt.

In den Abb. 6 und 7 sind die Mittelwerte der Einkornbetondruckfestigkeiten in Abhängigkeit von der rechnerischen Kornrohdkichte für den

Mörtel M 1 aufgetragen worden. Ohne Ausnahme zeigen die Versuche, daß die Einkornbetondruckfestigkeit mit zunehmender Kornrohddichte stark anwächst. Dieser Zusammenhang kann für einen relativ weiten Kornrohddichtebereich als proportional bezeichnet werden. Im oberen Bereich der untersuchten Kornrohddichten vermindert sich der Einfluß der Kornrohddichte. Die Ursachen für diese Erscheinung sind unterschiedlicher Natur. Sie sind in der Art des Zuschlags und in der gewählten Untersuchungsmethode zu sehen. Zunächst muß auf den grundsätzlichen Unterschied zwischen Blähschiefer und Blähton hingewiesen werden, der bereits durch den Herstellungsprozeß gegeben ist.

Das Rohmaterial für die Blähschieferherstellung besitzt als Ausgangsfestigkeit die Festigkeit des Schiefermaterials und eine zugehörige Rohddichte, die in guter Näherung dem spez. Gewicht entspricht. Durch den Blähprozeß wird die Kornfestigkeit bei gleichzeitiger Verringerung der Kornrohddichte abgebaut. Das gleiche gilt für den Zuschlag auch in Bezug auf den E-Modul. Die aus dem Ausgangsmaterial hergestellten Einkornbetone ergeben somit die Grenzfestigkeiten, der sich die in Abb. 7 dargestellten Kurven für Norlit stetig nähern. Für den Norlit 3-7 mm ist beispielsweise ab einer Kornrohddichte von $q_r = 1,5 \text{ g/cm}^3$ keine weitere Festigkeitssteigerung feststellbar. Es kann daher mit Recht vermutet werden, daß die zugehörige Grenzfestigkeit in gleicher Höhe oder sogar etwas niedriger liegt, obgleich die reine Zuschlagfestigkeit zweifellos weiter ansteigt. Die Ursache für diese Erscheinung ist darin zu sehen, daß sich auch mit wachsender Kornrohddichte das Steifigkeitsverhältnis zwischen Mörtel und Zuschlagpartikel erheblich ändert und ein Übergang zu einem Zweistoffsystem mit steifen Einschlüssen gegeben ist. Nur so ist es zu verstehen, daß trotz gleicher Mörteldruckfestigkeit Einkornbetone aus Detoon Druckfestigkeiten liefern, die teilweise erheblich über der Grenzfestigkeit von Norlit 3-7 mm liegen, obgleich die Kornfestigkeit des ungeblähten Schiefermaterials mit Sicherheit größer ist als die des geblähten Detoons. Bei einem Einkornbeton aus Zementmörtel und steifen Zuschlagpartikeln werden die eingeleiteten Druckkräfte über das Zuschlagkorn abgetragen. [3]. Der Mörtel sorgt in erster Linie für den Zusammenhalt der Zuschlagkörner und erfährt hierbei Zug- und Scherkräfte, die bei gleichem

Verformungsverhalten von Mörtel und Zuschlag nicht in dieser Größe auftreten. Die in 3.5 und 3.6 beschriebenen Versuche an Einkornbetonen aus Naturkies bestätigen diese Überlegungen.

Beim Blähton ist das Ausgangsmaterial ohne Festigkeit. Durch den Blähprozeß erfährt das Material zunächst bei gleichzeitiger Abnahme der Kornrohddichte eine Zunahme der Kornfestigkeit. Nach Überschreiten einer als optimal zu bezeichnenden Kornrohddichte führt die weiter ansteigende Kornporosität zu einer Verminderung der Kornfestigkeit. Für den Detoon 5-12 mm konnte dieses Festigkeitsmaximum bei einer Kornrohddichte von $\rho_r \sim 1,6 \text{ g/cm}^3$ nachgewiesen werden. Bei den übrigen Einkornbetonversuchen mit Blähtonzuschlägen war der untersuchte Kornrohddichtebereich nicht groß genug, um auch hier das zugehörige Druckfestigkeitsmaximum zu erreichen.

Die Versuche zeigen einen deutlichen Einfluß des Zuschlagtyps. Die größte Druckfestigkeit bei gleicher Kornrohddichte wurde für den Detoon gemessen. Im unteren Kornrohddichtebereich liegen die Einkornbetondruckfestigkeiten von Leca geringfügig über den vergleichbaren Werten von Norlit.

Aus den Abb. 6 und 7 erkennt man, daß auch der Korndurchmesser einen Einfluß auf die Einkornbetondruckfestigkeit ausübt. Für konstant gehaltene Kornrohddichte nimmt die Einkornbetondruckfestigkeit von Norlit und Leca mit zunehmendem Korndurchmesser ab. Der Einfluß des Korndurchmessers auf die Druckfestigkeit vermindert sich mit abnehmender Kornrohddichte. Auch der Detoon bildet keine Ausnahme, wenngleich sich hier ein Festigkeitsunterschied in Abhängigkeit vom Zuschlagdurchmesser erst bei sehr hohen Kornrohddichten zeigt. Die sich in diesem Zusammenhang zwangsläufig ergebende Frage, ob der Einfluß des Korndurchmessers nicht letztlich eine Folge der Prüfkörpergröße ist, muß verneint werden. Die in 3.6 beschriebenen Vergleichsversuche an Würfeln mit 20 cm Kantenlänge zeigen ebenfalls den Einfluß der Korngröße in annähernd gleicher Größenordnung.

Die mit den Mörteln M 2 und M 3 durchgeführten Versuche lassen trotz ihres begrenzten Umfangs erkennen, daß die oben beschriebenen Zusammenhänge hier ebenfalls gelten, wenn sie auch infolge der geringen Mörteldruckfestigkeit in abgeschwächter Form in Erscheinung treten.

3.3.2.3 Die Abhängigkeit der Einkornbetondruckfestigkeit von der Mörteldruckfestigkeit

Unter der Voraussetzung, daß Zuschlagtyp, Kornrohddichte, Korngröße und Zuschlagvolumenkonzentration konstant gehalten werden, nimmt die Einkornbetondruckfestigkeit mit wachsender Mörteldruckfestigkeit zu. Der Zusammenhang ist im Anfangsbereich linear. Mit weiter steigender Mörteldruckfestigkeit wird die Festigkeitszunahme des Einkornbetons in wachsendem Maße geringer bis ein Festigkeitsgrenzwert erreicht ist. Die Höhe des Festigkeitsgrenzwertes hängt im wesentlichen von Zuschlagtyp, Kornrohddichte und Korngröße ab. Eine weitere Festigkeitssteigerung durch Erhöhung der Mörteldruckfestigkeit ist nur in geringem Maße möglich, wenn von einer optimalen Zuschlagvolumenkonzentration für den Einkornbeton ausgegangen wird, wie sie für die vorliegenden Versuche ohne Ausnahme angestrebt wurde. Die Untersuchungen wurden zur Beschränkung des Versuchsumfangs praktisch auf eine hohe und niedrige Mörteldruckfestigkeit abgestellt. Wie Bild 4 erkennen läßt, genügen bereits diese wenigen Versuchspunkte, um den Festigkeitszusammenhang mit genügender Genauigkeit darstellen zu können. Die mit den Mörteln M 2 und M 3 durchgeführten Versuche sollten nach Möglichkeit die Grenzkurven des Festigkeitszusammenhangs belegen. Sie beschränkten sich daher auf einige wenige Kornrohddichten. Die Ergebnisse sind in den Abb. 8 bis 15 (Anhang) dargestellt worden.

3.3.2.4 Streuungen der Druckfestigkeitsergebnisse

Die in den Tabellen 9 bis 23 enthaltenen Einzelserien wurden für die Versuchsauswertung nach Zuschlagtyp, Korngruppe und Kornrohddichteklasse zusammengefaßt. Es entstanden auf diese Weise 33 Versuchsserien, für die sich folgende maximale Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert ergaben:

- a) Abweichungen 15 % : 2 Serien
- b) Abweichungen 10 bis 15 % : 11 Serien
- c) Abweichungen 5 bis 10 % : 18 Serien
- d) Abweichungen 5 % : 2 Serien

Die festgestellten Versuchsstreuungen lassen keine Abhängigkeit von Kornrohddichte oder Korngröße des Zuschlags erkennen. Die Größe der Abweichungen entspricht den bei Betonuntersuchungen üblichen Werten.

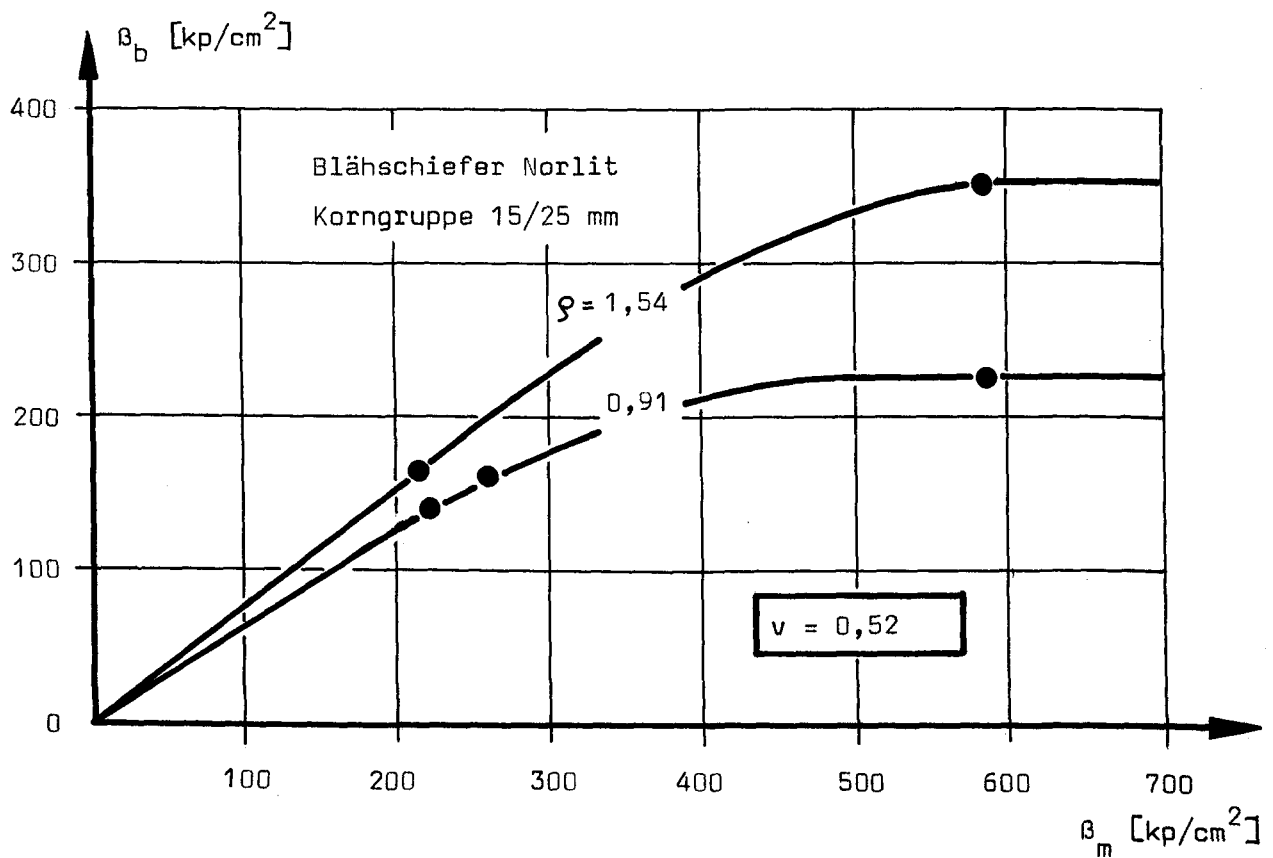


Bild 4: Einkornbetondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und der Kornrohddichte

3.3.2.5 E-Modul der Einkornbetone in Abhängigkeit von der Kornrohddichte bei konstantem E-Modul des Mörtels

Wie die in Abb. 16 und 17 über die Kornrohddichte aufgetragenen E-Modul-Meßwerte der mit Mörtel M 1 hergestellten Einkornbetone zeigen, wächst die Steifigkeit der Leichtzuschläge mit zunehmender Kornrohddichte. Eine Ausnahme bildet der Zuschlag Detoon 5-12 mm. Ähnlich wie bei der Druckfestigkeit kann ein Steifigkeitsmaximum bei einer Kornrohddichte von $\rho_r = 1,6 \text{ g/cm}^3$ festgestellt werden. Für den Leca 15-20 mm reichten die durchgeführten Messungen nicht aus, um einen eindeutigen Zusammenhang erkennen zu lassen. Der Einfluß der Kornrohddichte vermindert sich mit abnehmendem Mörtel-E-Modul.

Im Vergleich zu den Druckfestigkeitsergebnissen fällt auf, daß insbesondere für den Norlit der Einfluß der Korngröße verhältnismäßig gering ist. Diese Beobachtung kann damit erklärt werden, daß die E-Modul-Messungen weit unter der Bruchlast vorgenommen werden, während Festigkeitsuntersuchungen das Bruchverhalten widerspiegeln.

3.3.2.6 E-Modul der Einkornbetone in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels

Unter der Voraussetzung, daß Zuschlagtyp, Kornrohddichte, Korngröße und Zuschlagvolumenkonzentration konstant gehalten werden, nimmt der E-Modul des Einkornbetons mit wachsendem E-Modul des Mörtels zu. Der gemessene Zusammenhang entspricht im wesentlichen der in 3.3.2.3 beschriebenen Abhängigkeit zwischen Einkornbetondruckfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit. In Bild 5 sind die Meßergebnisse für Norlit 15-25 mm dargestellt. Die Zusammenhänge sind außerdem vollständig in den Abb. 18 bis 21 des Anhangs aufgetragen.

Zur Überprüfung der an den kleinen zylindrischen Prüfkörpern gewonnenen E-Modul-Meßwerte wurden für den Mörtel M 1 zusätzlich Prismen 10/10/55 cm hergestellt. Die Messung der Verformungen erfolgte mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer. Die in Tabelle 25 zusammengestellten

Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmung mit den an den kleinen Zylindern gefundenen E-Moduln.

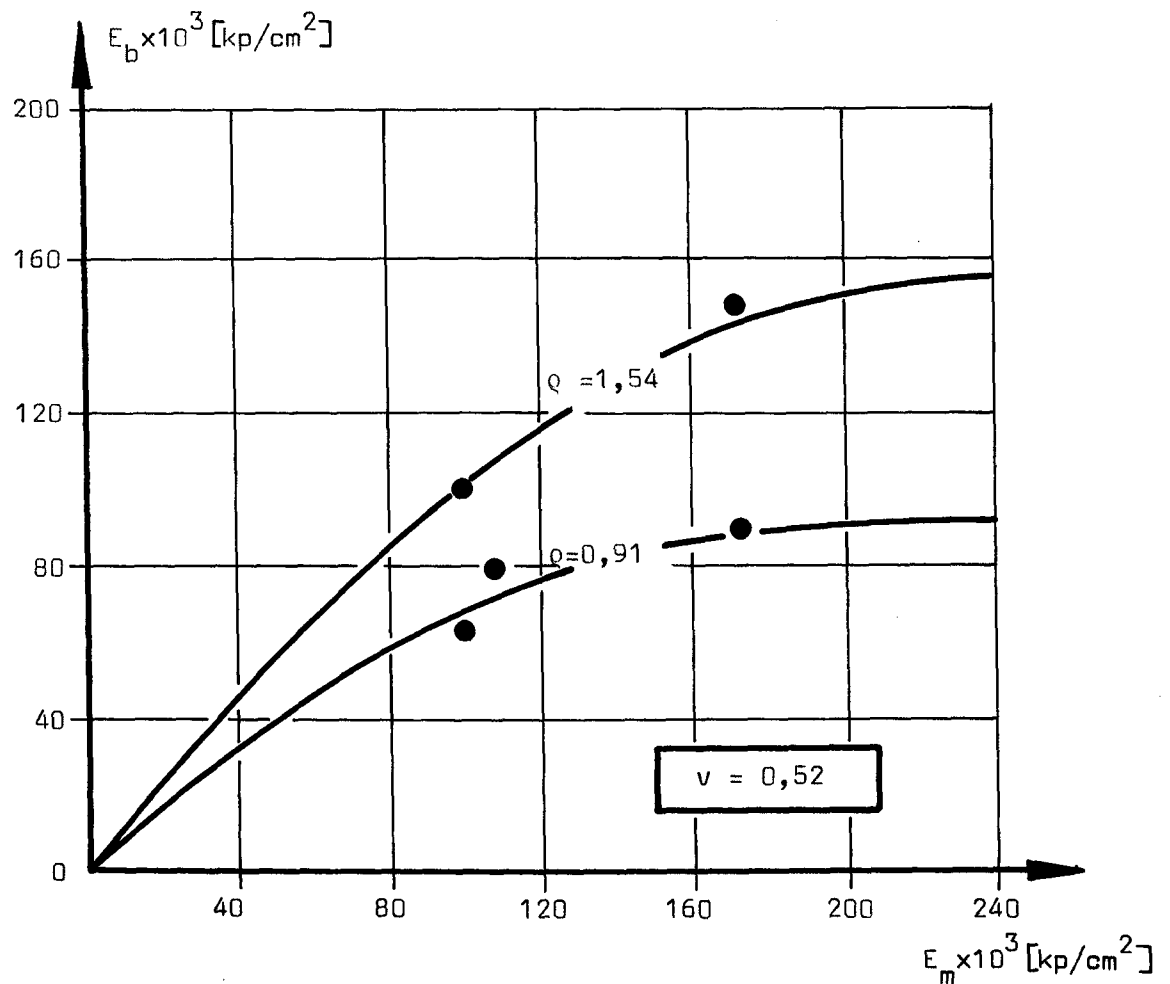


Bild 5: E-Modul des Einkornbetons in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels bei konstant gehaltener Kornrohddichte für Norlit 15-25 mm

3.4 Untersuchungen an Einkornbetonen mit Leichtzuschlägen des Ausgangsmaterials

Aus Tafel 7 wird der Umfang der am Ausgangsmaterial durchgeführten Einkornbetonversuche ersichtlich. Die Versuche beschränken sich auf die Anwendung des Mörtels M 1. Die Versuchsdurchführung entsprach

den unter 3.3.1 gemachten Angaben. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 18 bis 20 (Anhang) zusammengestellt worden. Ein Vergleich dieser Meßwerte mit den entsprechenden Versuchsergebnissen am nach Kornrohdichteklassen aufgeteilten Leichtzuschlagmaterial ergibt im einzelnen:

- a) Die Druckfestigkeitsergebnisse fügen sich gut in die in Abhängigkeit von der Kornrohdichte gefundenen Festigkeitszusammenhänge ein. Eine Ausnahme bildet nur die für Detoon 5-12 mm gefundene Druckfestigkeit, die um 20 % unter dem Sollwert liegt. Diese Versuchsserie kann im Hinblick auf die übrigen Ergebnisse nur als Ausreißer gewertet werden.
- b) Bei den E-Modul-Ergebnissen sind es die Einkornbetone aus Norlit 3-7 mm, Leca 15-20 mm und Detoon 5-12 mm, die mit 15 bis 40 % ganz beträchtlich von den Sollwerten abweichen. Die Meßwerte für die übrigen Korngruppen stimmen wiederum gut mit den Sollwerten überein. Die festgestellten Abweichungen dieser Stichprobenversuche lassen keine Gesetzmäßigkeit erkennen. Ihre Ursachen sind in erster Linie in der Herstellung der Prüfkörper und fehlerhafter Versuchsdurchführung zu suchen.

Die Zuschlagkorngruppen des Ausgangsmaterials unterscheiden sich von den entsprechenden nach Kornrohdichteklassen getrennten Korngruppen dadurch, daß die in ihr enthaltenen Zuschlagkörner eine erheblich größere Streubreite hinsichtlich der Kornrohdichte und damit der Korneigenschaften aufweisen. Abgesehen von den aufgetretenen Abweichungen läßt sich feststellen, daß mit den gewählten Prüfkörpern die mittleren Einkornbetoneigenschaften zutreffend bestimmt werden können. Dieses Ergebnis ist insofern wichtig, als an eine Prüfung der Zuschlagkorneigenschaften vermittels Einkornbetonversuche gedacht werden könnte.

3.5 Untersuchungen an Einkornbetonen aus natürlichen Zuschlägen

Die Tabellen 21 und 22 enthalten die Ergebnisse der an Einkornbetonen aus natürlichen Kieszuschlägen durchgeführten Versuche. Herstellung

der zylindrischen Prüfkörper sowie Versuchsdurchführung entsprachen den unter 3.3.1 gemachten Angaben. Die Mörteldruckfestigkeit wurde durch Anwendung der Mörtel M 1 und M 4 in einem Festigkeitsbereich von 115 kp/cm^2 bis 585 kp/cm^2 variiert. Für die Korngruppen 3-7 mm wurde nur eine Serie mit Mörtel M 1 hergestellt. Die Druckfestigkeitsergebnisse sind graphisch in Bild 6 dargestellt. Bei einem Vergleich mit den entsprechenden Leichtbetonversuchen sind 3 Punkte besonders hervorzuheben:

- a) Die Einkornbetondruckfestigkeit steigt proportional zur Mörteldruckfestigkeit an. Der Einfluß des Zuschlags bzw. der Prüfkörperform wirkt sich nur in der Steigung der Geraden aus.
- b) Der Einfluß der Korngröße ist relativ gering. Er wird praktisch nur im Vergleich mit der Korngruppe 3-7 mm sichtbar.
- c) Die mit dem Mörtel M 1 für die Korngruppen 7-15 und 15-25 mm erzielten Druckfestigkeiten liegen teilweise ganz erheblich unter den für Norlit und Detoon mit $\rho_r > 1,4 \text{ g/cm}^3$ gewonnenen Werten. Dieses Ergebnis läßt sich in erster Linie aus der sehr unterschiedlichen Steifigkeit von Zuschlag und Mörtel erklären, (vergl. hierzu auch 3.3.2.2). Ein gewisser Einfluß ist auch der Tatsache zuzuschreiben, daß durch das fehlende Wassersaugen der Schwerzuschläge der w/z-Wert geringfügig von dem der Leichtbetonversuche abweicht und somit ein größerer Leimporengehalt gegeben ist, vgl. auch weiter unten.

An den mit Mörtel M 1 hergestellten Einkornbetonen K 1.1 bis K 3.1 wurde der E-Modul gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 angegeben. Entsprechend Tafel 11 kann dem Mörtel im Mittel ein E-Modul von 172000 kp/cm^2 zugeordnet werden. Dieser Wert wurde, wie bereits in 3.3.2.1 ausgeführt, durch Messungen an Prismen $10/10/55 \text{ cm}$ erhärtet. Für den Naturkies 3-7 mm und 7-15 mm lagen die gemessenen E-Moduln in der Größenordnung des Mörtel-E-Moduls, während der Naturkies 15-30 mm einen um 35 % geringeren Wert ergab. Aus [7] und [28] lassen sich folgende E-Moduln für die verschiedenen Schwerbetonzuschläge entnehmen:

Sandstein	100000 kp/cm ²
Granit	450000 "
Quarz	750000 "
Basalt	1100000 "

Der E-Modul des verwendeten Naturkieses wurde nicht bestimmt. Aus den Meßwerten der Einkornbetone ergeben sich mit Hilfe der in [7] angegebenen Beziehung

$$E_a = \frac{E_b (1 + v_a) - E_m (1 - v_a)}{E_m (1 + v_a) - E_b (1 - v_a)} \cdot E_m \quad (4)$$

folgende E-Moduln für den verwendeten Naturkies:

- a) 3 - 7 mm und 7 - 15 mm : $E_a \sim 180000 \text{ kp/cm}^2$
- b) 15 - 30 mm : $E_a \sim 79000 \text{ kp/cm}^2$

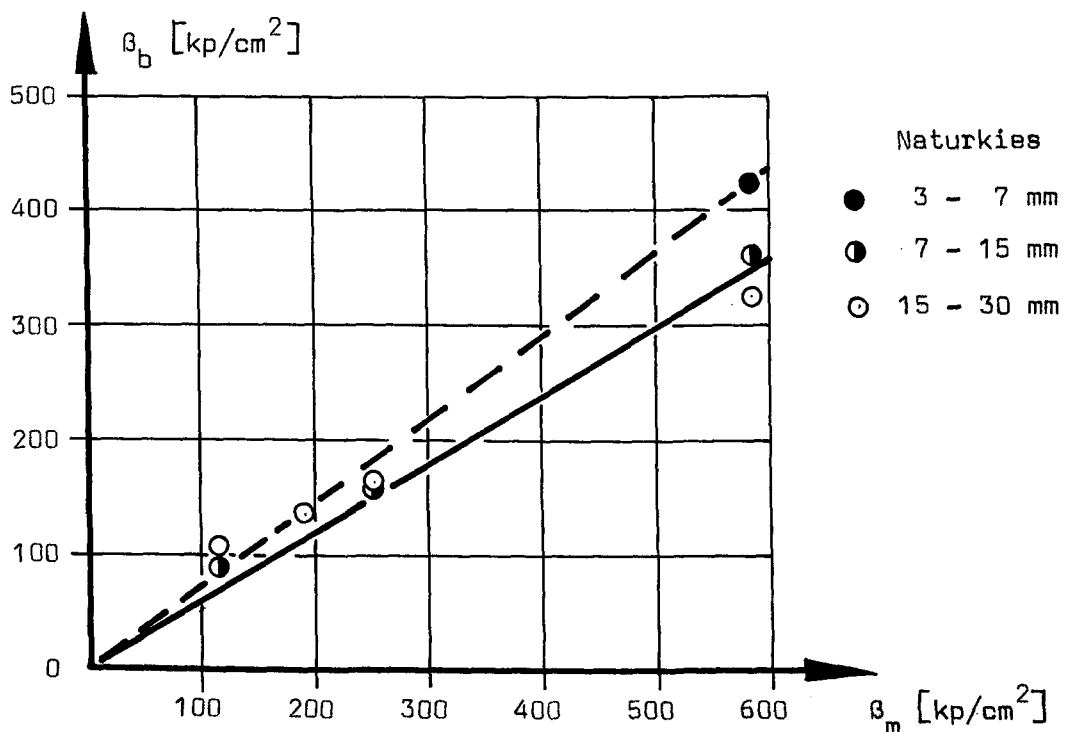


Bild 6: Einkornbetondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit für Naturkies

Das obige Rechenergebnis entspricht nicht den wirklichen Verhältnissen. Es muß vielmehr davon ausgegangen werden, daß der E-Modul der verwendeten Schwerbetonzuschläge zwischen den Werten 450000 kp/cm^2 und 1000000 kp/cm^2 lag, so daß zusätzliche Einflüsse die E-Moduln der Einkornbetone derart stark vermindert haben müssen. Das Meßergebnis für den Naturkies 15 - 30 mm weist darauf hin, daß sich infolge der steifen Zuschlagpartikel das Verhältnis Prüfkörpergröße zu Korndurchmesser auf das E-Modul-Ergebnis erheblich auswirkt. Die in dichter Packung gelagerten Zuschlagpartikel üben unter Last eine Keilwirkung aus, die infolge des geringen Prüfkörperdurchmessers und der relativ weichen Mörtelmatrix zu ungehinderten größeren Verformungen führt. Die Verformungen werden durch Schrumpfporen im Bereich der Grenzschicht zwischen Zuschlag und Mörtel begünstigt. Die Entstehung der Schrumpfporen läßt sich dadurch erklären, daß das Zuschlaggerüst, gestützt durch die Schalung, nicht in der Lage ist, dem Schrumpfprozeß des Mörtels zu folgen. Infolge der im jungen Alter geringen Haftfestigkeit kommt es demzufolge zu Ablösungen, die Gleitungen zwischen Zuschlag und Mörtel erleichtern. Die gefundenen E-Modul-Werte können daher nicht als reale Größen angesehen werden. Eine Bestimmung des E-Moduls für derartige Steifigkeitsverhältnisse ist nur mit entsprechend größeren Prüfkörpern möglich. Es muß in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, daß sich für die Druckfestigkeit die Prüfkörpergröße nicht in dem gleichen Maße ungünstig auswirkt, wie die in Abschnitt 3.6 beschriebenen Versuche beweisen.

3.6 Vergleichsversuche an Einkornbetonen mit Würfeln von 20 cm Kantenlänge und kritische Beurteilung der Druckfestigkeitsergebnisse

Über die Herstellung und Prüfung einzelner Einkornbeton- und Mörtelwürfel mit 20 cm Kantenlänge wurde der Versuch unternommen, eine Aussage über den Gestaltseinfluß der zylindrischen Prüfkörper mit $d/h = 50/70 \text{ mm}$ zu gewinnen. Bei der Herstellung der Würfel wurde das gleiche Verfahren angestrebt wie für die kleinen Zylinder, was nicht ausschließt, daß sich infolge der erheblichen Unterschiede in der Prüfkörpergröße zwangsläufig gewisse Abweichungen ergaben. Mörtel und

Zuschläge wurden schichtweise in die Form eingefüllt. Jede Schicht wurde auf einem Rütteltisch unter Auflast verdichtet. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 23 und 25 angegeben. Ein Vergleich der Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit führt auf die in Tafel 13 angegebenen Verhältnismerte.

Tafel 13: Verhältnis von Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit verschiedener Einkornbetone

Zuschlag	Korngruppe [mm]	Kornrohddichte ρ_r [g/cm ³]	Prüfalter (Tage)	β_b / β_{w20}
Naturkies	7 - 15	2,56	7	0,84
	15 - 30	2,58	7	0,79
Leca	7 - 15	0,71	7	0,93
	15 - 20	0,72	7	0,78
Detoon	5 - 12	1,34	7	0,93
Mörtel M 1		-	7	1,33 (1,15) ^{*)}

*) Unter Zugrundelegung der Prismenfestigkeit der Serie Mw 1.1 gem. Tabelle 25

Die stichprobenartigen Versuche ergaben für die untersuchten Einkornbetone ohne Ausnahme eine geringere Druckfestigkeit für die kleinen Zylinder. Die Würfeldruckfestigkeit des Mörtels M 1 ist im Vergleich zur ebenfalls ermittelten Prismenfestigkeit zu niedrig ausgefallen. Die relativ niedrigen Würfelrohddichten deuten auf geringere Verdichtung gegenüber den kleinen Zylindern hin.

Wie aus [38] zu entnehmen ist, haben Untersuchungen von Joosting gezeigt, daß Bohrkern mit 50 mm Durchmesser und einer Höhe von im Mittel 56 mm die gleiche Druckfestigkeit ergeben wie die zugehörigen

20-cm-Würfel. Die zur weiteren Klärung dieser Frage von Henzel und Freitag [38] durchgeführten Versuche ergaben für Bohrkerne mit 50 mm Durchmesser und 50 mm Höhe eine Druckfestigkeit, die im Durchschnitt um 10 % über der zugehörigen Würfeldruckfestigkeit lag. Dieses Ergebnis deutet auf einen echten Gestaltseinfluß hin, da keine Abhängigkeit von Betongüte und Zuschlaggröße festgestellt werden konnte. Erwartungsgemäß ergaben sich für die 5-cm-Bohrkerne etwa doppelt so große Prüfstreuungen wie beispielsweise für 15-cm-Bohrkerne. Die aus einem Sieblinienbeton gezogenen 5-cm-Bohrkerne weisen eine dem Zufall überlassene Kornstruktur auf, die von Kern zu Kern sehr unterschiedlich sein kann und zu den größeren Prüfstreuungen führt. Bei den vorliegenden Leichtbetonuntersuchungen war durch das Herstellverfahren sowie durch die Tatsache, daß es sich um Einkornbetone handelte, eine relativ gleichbleibende Makrostruktur gewährleistet. Die an Einkornbetonen aus Naturkies gefundenen Druckfestigkeiten zeigen im Gegensatz zu den Ergebnissen von Henzel und Freitag gem. Bild 6 einen gewissen Einfluß des Korndurchmessers auf die Betonfestigkeit. Dieses Phänomen läßt sich aus dem zwischen Sieblinien- und Einkornbeton bestehenden Gefügeunterschied erklären. Im allgemeinen erfahren die groben Zuschlagkörner eines Sieblinienbetons auch bei intensiver Verdichtung nicht eine derart dicht gepackte Lagerung wie sie bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Einkornbetonversuchen erzielt wurde. Einen noch stärkeren Einfluß der Korngröße zeigen die aus den Leichtzuschlägen hergestellten Einkornbetone. Da der aus einem stark unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnis zwischen Mörtelmatrix und Zuschlagpartikel herrührende Spalteffekt, auf den bereits mehrfach hingewiesen wurde, bei den relativ weichen Leichtzuschlagkörnern nur eine untergeordnete Rolle spielen kann, handelt es sich folglich bei dem Einfluß der Korngröße auf die Druckfestigkeit um eine spezifische Leichtzuschlageigenschaft.

Die Frage nach dem Verhältnis der Druckfestigkeit des kleinen Zylinders zu der des 20-cm-Würfels läßt sich anhand der wenigen Versuche nicht statistisch gesichert beantworten. Geht man von den Ergebnissen von Henzel und Freitag aus, so muß zusätzlich berücksichtigt werden,

daß die im Rahmen dieser Untersuchungen gewählten Zylinder mit wenigen Ausnahmen eine Zylinderhöhe von 70 mm aufweisen. Für die Zylinder ergibt sich damit eine Schlankheit von $h/d = 1,4$, die nach Hummel [13] eine Festigkeitsminderung von etwa 10 % bewirkt. Der Einfluß der Schlankheit kompensiert somit die von Henzel und Freitag für 5-cm-Bohrkerne festgestellte Festigkeitserhöhung von 10 %. Es kann demnach für die weiteren Überlegungen davon ausgegangen werden, daß der kleine Zylinder annähernd die Druckfestigkeit des 20-cm-Würfels ergibt.

3.7 Untersuchungen an Mehrkornbetonen aus Leichtzuschlägen

Die durchgeführten Einkornbetonversuche wurden durch die Prüfung von 16 Mehrkornbetonen aus Leichtzuschlägen mit stetiger Sieblinie ergänzt. Die Mischungszusammensetzungen gehen aus Tabelle 32 hervor. Für die Mischungen N III 35 bis N III 47 wurden die Leichtzuschläge einer 7-tägigen Wasserlagerung unterworfen. Weitere Einzelheiten können Abschnitt 2.3 entnommen werden. Für die übrigen Mischungen wurden die Zuschläge trocken zugegeben. Die gewählten Zementgehalte bewegten sich zwischen 230 und 659 kg/m³. Das Verdichtungsmaß nach Walz lag zwischen 1,00 und 1,46, die Frischbetonrohdichte zwischen 1,224 und 1,970 t/m³. Wie aus Tabelle 33 abgelesen werden kann, ergaben sich Würfeldruckfestigkeiten zwischen 137 und 530 kp/cm² sowie E-Moduln zwischen 98000 und 217000 kp/cm². Das Prüfalter wurde zwischen 3 und 28 Tagen variiert.

3.8 Untersuchungen an den Feinmörteln der Mehrkornbetone

Die nachfolgend beschriebenen Versuche hatten das Ziel, die Mörtel-druckfestigkeit der in Abschnitt 3.7 behandelten Sieblinienbetone unter Berücksichtigung des Festigkeitseinflusses der Leichtzuschlag-korngruppe 0-3 mm zu bestimmen. Die Zusammensetzung der Mörtel ist in Tabelle 30 angegeben. Sie entsprach der Mörtelzusammensetzung in den zugehörigen Leichtbetonen. Das Problem derartiger Untersuchungen ist in der Wahl des richtigen Wassergehalts zu sehen, da hier Fehler zu einem völlig falschen Bild führen würden. Die im Leichtbeton

enthaltenen Zuschlagkorngruppen > 3 mm saugen, sofern sie trocken zugegeben werden, einen gewissen Wasseranteil auf. In den reinen Mörtelmischungen fehlen diese Zuschlagkorngruppen. Für die Mörtelmischungen ist daher der Wasserzusatz um den Anteil zu reduzieren, der dem in der Leichtbetonmischung enthaltenen Mörtel ebenfalls durch das Vorhandensein der Korngruppen > 3 mm verlorenggeht. Dieser Wasserverlust wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nur in der Größenordnung abgeschätzt. Hierzu dienten die in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Versuche über die Wasseraufnahme der Leichtzuschläge. Für den Zuschlag Norlit wurde der Wasserverlust mit 5 Gew. % und für Leca mit 7,6 Gew. % des Zuschlaganteils > 3 mm abgeschätzt. Für die Leichtbetonmischungen N III 35 bis N III 47 wurde das Wassersaugen der Leichtzuschläge durch eine 7-tägige Wasserlagerung ausgeschaltet. Bei dem zugehörigen Mörtelversuch wurde jedoch auf eine Wasserlagerung der Leichtzuschlagkorngruppe 0-3 mm verzichtet. In diesem Fall mußte daher der Wasserzusatz um 5 Gew. % des trocken zugegebenen Leichtzuschlags 0-3 mm erhöht werden. Für die Leichtbetonmischungen aus Detoon wurden keine Mörtelversuche durchgeführt. Die Druckfestigkeitsergebnisse der Mörtelversuche sind in Tabelle 31 zusammengestellt.

3.9 Die Eigenschaften der verwendeten Zemente

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Zementsorten und -güten verwendet. Die an den Zementen durchgeführten Normenprüfungen sind in Tabelle 29 vollständig angegeben.

3.10 Druckzylinderversuche an Leichtzuschlägen in Abhängigkeit von der Kornrohichte

Ziel und Umfang der am losen Zuschlaghaufwerk durchgeführten Druckzylinderversuche gehen aus Abschnitt 3.1 sowie Tafel 9 hervor.

3.10.1 Versuchsdurchführung

Das für die Zuschlagprüfung verwendete Druckzylindergerät wurde dem Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau freundlicherweise von der Germania Zementwerke AG, Misburg, leihweise zur Verfügung gestellt. Es handelte sich um ein den Angaben der russischen Norm TY 02 - 59 entsprechendes Gerät mit einem lichten Innendurchmesser von 75 mm und einer Füllhöhe von 150 mm, vgl. Bild 7.

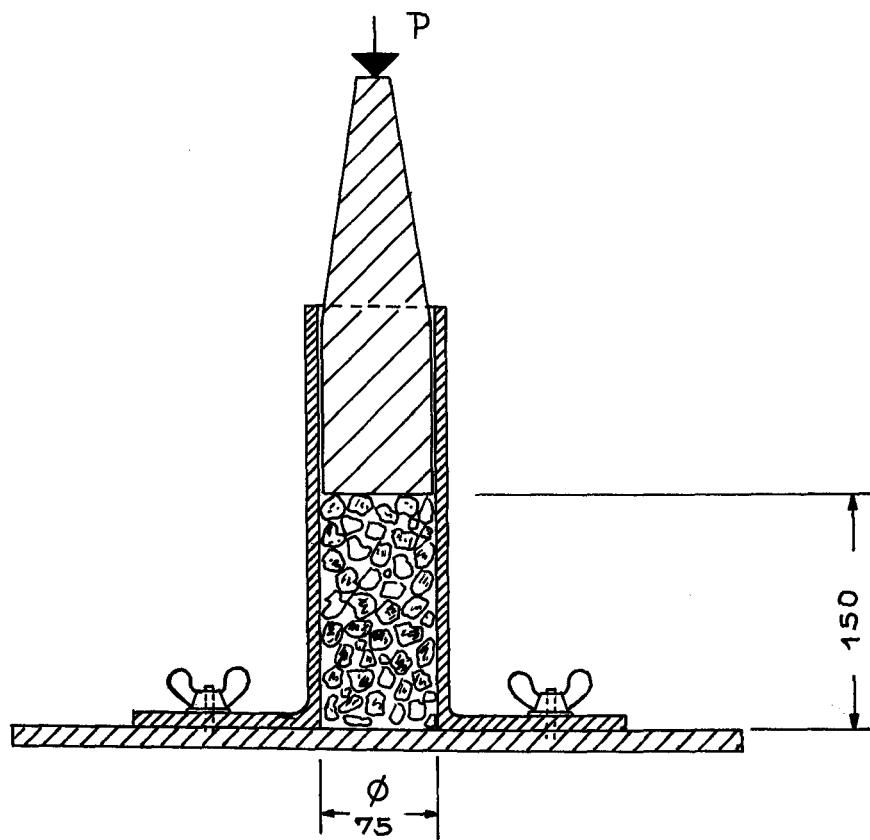


Bild 7: Druckzylindergerät

Der eingefüllte Zuschlag wurde nach Aufsetzen des Kolbens leicht verdichtet, indem das Gerät 10 mal etwa um 1 cm einseitig angehoben und frei fallen gelassen wurde. Nach der anschließenden Korrektur der Füllhöhe wurde das Füllgewicht ermittelt. In einer 200 Mp - MAN - Würfelprüfmaschine wurde durch Belastung des Kolbens das Zuschlaghaufwerk zusammengedrückt. Gemessen wurden Belastungshöhe und zugehörige

Kolbenverschiebung. Die Ablesung der Verschiebungen erfolgte an einem auf dem Kolben befestigten Maßstab, mit einer Genauigkeit von 0,5 mm. Die Belastung wurde in Laststufen aufgebracht. Bis zur Belastungshöhe von 3 Mp betrug die Laststeigerung jeweils 0,5 Mp. Danach wurden die Laststufen auf 1, 2 und schließlich 5 Mp vergrößert. Im Regelfall wurden die Versuche bei einer Belastung von 15 Mp abgebrochen. Die Belastungsgeschwindigkeit konnte in den unteren Laststufen nicht gesteuert werden. Aus den erheblichen Kolbenverschiebungen während der Anfangsphase des Versuchs ergab sich eine sehr geringe Belastungsgeschwindigkeit, die sich erst mit zunehmender Verdichtung des Zuschlagmaterials steigern ließ. Nach Erreichen der jeweiligen Laststufe wurde die Last konstant gehalten. Das Ablesen der Kolbenverschiebung wurde vorgenommen, sobald der Kolben unter der konstant gehaltenen Belastung augenscheinlich zur Ruhe gekommen war. Je nach vorhandenen Zuschlagmengen wurden bis zu 5 Einzelversuche pro Versuchsserie durchgeführt. Die Zuschläge wurden nach Korngruppen getrennt geprüft. Zuschlaganteile < 3 mm wurden ausgesiebt.

3.10.2 Versuchsergebnisse

Als Ergebnis der in Abschnitt 3.10.1 beschriebenen Druckzylinderversuche wurden Last-Weg-Gesetze für die untersuchten Korngruppen in Abhängigkeit von Zuschlagtyp, Korngröße und Kornrohddichte erhalten, wie sie als Beispiel in Bild 8 dargestellt sind. Die Mittelwerte der Versuchsergebnisse sind in den Abb. 22 bis 23 aufgetragen. Auf die umfangreiche tabellarische Wiedergabe sämtlicher Einzelmeßergebnisse wurde im Rahmen dieses Berichts verzichtet.

Aus Bild 8 ist zu erkennen, daß die Last-Weg-Gesetze ohne Ausnahme einen nahezu geradlinig verlaufenden Anfangsbereich aufweisen. Mit weiter ansteigender Belastung verringert sich das Haufwerksporenvolumen stark durch fortschreitende Zerstörung des Korns, so daß sich folglich auch die Zunahme der Kolbenverschiebung verringert.

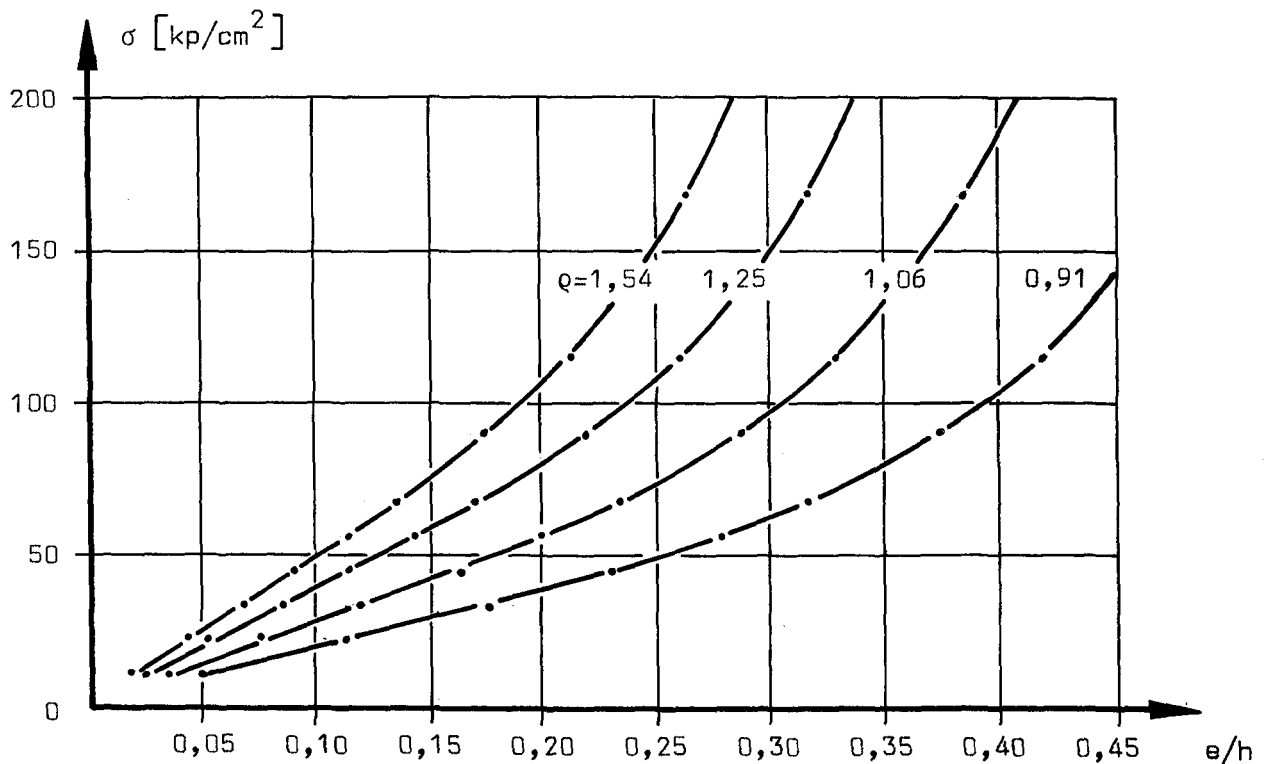


Bild 8: Last-Weg-Gesetze für Norlit 15 - 25 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

h = Füllhöhe e = Kolbenverschiebung

Der lineare Anfangsbereich des Last-Weg-Gesetzes stellt das charakteristische Festigkeitsverhalten eines Zuschlags unter ganz bestimmten Versuchsbedingungen dar. Von der ersten Kolbenverschiebung an setzt infolge punktförmiger Belastung der sich berührenden Zuschlagkörner die Zerstörung einzelner Körner ein. Die fortschreitende Kornzerstörung führt schließlich zur fast völligen Beseitigung des ursprünglichen Haufwerkporenvolumens, so daß sich für die bis dahin noch nicht zerstörten Körner ganz andere Versuchsbedingungen einstellen. Die Übergänge sind fließend. Letzten Endes liegt ein Überwiegend komprimiertes und unter hoher Belastung nur noch wenig verformbares Material vor. Bei extrem hoch gewählter Belastung ist die zugeordnete Kolbenverschiebung im wesentlichen eine Funktion der Gesamtporosität

des eingefüllten Zuschlaghaufwerks, die keine Aussage über die Kornfestigkeit ermöglicht. Die Vorgabe einer bestimmten Kolbenverschiebung und die Ermittlung der zugehörigen erforderlichen Belastung birgt ebenfalls Gefahren in sich, da je nach Zuschlagtyp bzw. Anfangshohlraumvolumen ein noch nicht oder bereits schon weitgehend komprimiertes Material vorliegen kann. Aus diesen Gründen wurde für die Versuchsauswertung die Neigung des linearen Kurvenbereichs als Zuschlagkennwert K gem. Gleichung (5) definiert und den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt.

$$K = \frac{\sigma \cdot h}{10^2 \cdot e} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad (5)$$

Die Versuche ergaben eine Vergrößerung des Zuschlagkennwerts K mit ansteigender Kornrohddichte. Eine Ausnahme bildeten die Versuchsserien für Leca 15 - 20 mm und Detoon 2 - 5 mm, für die der untersuchte Kornrohddichtebereich nicht ausreichte, um eine eindeutige Abhängigkeit festzustellen. In den Abb. 38 und 39 ist der Zusammenhang zwischen Kornrohddichte und Kennwert K dargestellt. Für den Zuschlag Norlit ergibt sich hiernach für jede Korngruppe eine klare Beziehung zwischen Einkornbetondruckfestigkeit und Kennwert K. Der Kennwert K ermöglicht im vorliegenden Fall eine Aussage über die zu erwartende Einkornbetondruckfestigkeit und stellt somit ein echtes Festigkeitskriterium für den Zuschlag Norlit dar. Für Leca 3 - 7 mm und Detoon 5 - 12 mm kann die gleiche Feststellung getroffen werden. Ein zunächst unerwartetes Ergebnis lieferte Detoon 2 - 5 mm. Im Widerspruch zu den Ergebnissen der Einkornbetonversuche ergaben sich für Detoon 2 - 5 mm niedrigere Kennwerte K als für Detoon 5 - 12 mm. Dieses Phänomen läßt sich nur über die Struktur des Zuschlagkorns erklären. Im Gegensatz zum Leca und Norlit besitzt das Detoon-Zuschlagkorn eine sehr harte und spröde Außenschale, die zum Zerplatzen und Abspringen neigt. Bereits in 2.2 wurde darauf hingewiesen, daß sich aus den Detoon-Körnern keine Prüfkörper Herausschleifen ließen. Das unterschiedliche Kornverhalten äußert sich schon bei einem ganz einfachen Hammerschlagtest, der für Detoon bei deutlich geringerer Schlagenergie zur Zerstörung des Korns

führt als für Norlit und Leca. Das Versuchsergebnis für den Detoon 2 - 5 mm läßt sich somit dadurch erklären, daß das Material mit zunehmender Härte besonders eine Versprödung der Außenschale erfährt, die bei punktförmiger Beanspruchung schneller eine Zerstörung des Kornes nach sich zieht. Es ist auch denkbar, daß die Kornaußenschalen als Folge des Herstellungsprozesses bereits unter Eigenspannungen stehen. So gesehen liefert das Druckzylinderverfahren auch für den Detoon ein charakteristisches Festigkeitsverhalten, das allerdings nicht mehr im Einklang mit den Ergebnissen der Einkornbetonversuche steht. Wie am Detoon deutlich wird, kann bereits die Beurteilung verschiedener Korngruppen des gleichen Zuschlagtyps mit Hilfe des Druckzylinderverfahrens bzw. des Kennwerts K zu einer Fehleinschätzung führen. Das gilt in verstärktem Maße bei einem Vergleich verschiedener Zuschlagtypen untereinander. Es ist daher unerläßlich, zusätzlich das tatsächliche Festigkeitsverhalten der in Mörtel eingebetteten Zuschläge zu bestimmen. Unter diesem Aspekt kann sich das Druckzylinderverfahren zu einer sinnvollen Ergänzung entwickeln.

Für unveränderten Zuschlagtyp und konstant gehaltene Zuschlagkornroh-dichte läßt sich eine Zunahme des Kennwerts K mit abnehmender Korngröße registrieren. Der Einfluß der Korngröße auf den Kennwert verringert sich spürbar mit sinkender Kornroh-dichte.

Interessant ist auch die Frage nach dem Einfluß des Zuschlagtyps auf den Kennwert K. Detoon weist für gleiche Kornroh-dichte und etwa gleiche Korngröße im Vergleich zu den anderen beiden Zuschlagtypen die höchsten Zuschlagkennwerte auf, während sich Leca demgegenüber im Bereich sehr niedriger Kennwerte bewegt. Man erkennt weiter einen sehr wesentlichen Unterschied zwischen den einzelnen Zuschlagtypen. Ganz offensichtlich streben die Kennwerte K einem Grenzwert zu, nämlich dem des ungeblähten Materials, während sich für Blähtone nach Überschreiten einer bestimmten vom Zuschlagtyp und der Korngruppe abhängigen Grenzroh-dichte wieder ein Abfallen der Kennwerte andeutungsweise einstellt. Der untersuchte Kornroh-dichtebereich war jedoch nicht in allen Fällen ausreichend, um dieses Maximum für die Zuschlagkennwerte K durch Versuchsergebnisse zu belegen.

Obwohl für die einzelnen Druckzylinderversuche das Zuschlagfüllgewicht relativ gleichbleibend eingestellt werden konnte, ergaben sich besonders für den Anfangsbereich erhebliche Abweichungen der bezogenen Zusammendrückung des Zuschlags vom Mittelwert, die jedoch bis auf wenige Ausnahmen sehr schnell unter 10 % und sogar 5 % absanken. Die in Abhängigkeit von der bezogenen Zusammendrückung aufgetretenen Abweichungen sind in den Abb. 30 bis 32 für sämtliche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte durchgeführten Versuche dargestellt. Ein Zusammenhang zwischen Kornrohddichte und aufgetretener Streuung läßt sich nicht erkennen.

Die Abweichungen der Zuschlagkennwerte K vom zugehörigen Mittel ergaben sich für Leca und Detoon unter 10 %. Für die insgesamt durchgeführten 12 Versuchsserien an Norlit-Zuschlag stellten sich für 1 Serie 30 %, für 1 weitere Serie etwas mehr als 20 %, für 4 Serien 10 bis 20 % und für 6 Serien < 10 % Abweichung ein. Betrachtet man die Gesamtheit aller durchgeführten Versuchsserien, so liegen in 76 % aller Fälle die Abweichungen unter 10 %. Die unsystematisch aufgetretenen hohen Abweichungen lassen sich nur durch die zufallsbedingte Kornlagerung und Kornform sowie eventuelle Einflüsse aus der Versuchsdurchführung, wie Verkantung des Kolbens und erhöhte Reibungskräfte, erklären.

3.11 Druckzylinderversuche am Ausgangsmaterial

Die an den Leichtzuschlägen des Ausgangsmaterials durchgeführten Druckzylinderversuche zeigen relativ gute Übereinstimmung mit den kornrohddichteabhängigen Untersuchungen. In Tafel 14 sind die am Ausgangsmaterial bestimmten Kennwerte K den sich aus Abb. 34 und 35 für die gleiche Kornrohddichte ergebenden Werten K gegenübergestellt.

Tafel 14: Kennwert K des Ausgangsmaterials

Zuschlag	Korngruppe [mm]	Kornrohddichte [g/cm ³]	Zuschlagkennwert K [kp/cm ²]	
			Ausgangs- material	gem. Abb. 34 und 35
Norlit	3 - 7	1,39	5,44	5,20
	7 - 15	1,19	3,09	3,90
	15 - 25	1,13	2,75	3,10
Leca	3 - 7	0,78	1,69	1,80
	7 - 15	0,76	1,53	1,50
	15 - 20	0,76	0,70	1,30
Detoon	2 - 5	1,26	5,43	5,20
	5 - 12	1,20	4,92	5,30

4. Theoretische Auswertung der Versuchsergebnisse

4.1 Zusammenhang zwischen Einkorn- und Mehrkornbetondruckfestigkeit

Zur Bestimmung der Leichtbetondruckfestigkeit wurden bereits die unterschiedlichsten Formeln vorgeschlagen [11] , [15] , [20] , [27] , [39] . Die meisten dieser Formeln besitzen nur einen beschränkten Gültigkeitsbereich, da in der Regel wichtige Einflußgrößen vernachlässigt werden. Einige Beziehungen enthalten Einflußgrößen, die experimentell noch nicht in ausreichender Weise bestimmt werden können.

Es ist bekannt, daß bereits die verschiedenen Korngruppen eines Leichtzuschlagtyps unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen können. Das drückt sich nicht zuletzt in den unterschiedlichen Kornrohddichten der einzelnen Korngruppen aus. Abweichend von den bisherigen experimentellen Methoden und theoretischen Überlegungen wurde

nach einem Festigkeitsmodell gesucht, das die Berücksichtigung der Zuschlagfestigkeit jeder einzelnen im Beton enthaltenen Korngruppe ermöglicht. Für eine praktische Anwendung war es außerdem wichtig, daß die notwendigen Einflußgrößen experimentell bestimmt werden können. Ausgegangen wurde von der Modellvorstellung des aus Matrix und Zuschlag gebildeten Zweistoffsystems. Die Matrix stellt die kontinuierliche, der Zuschlag die disperse Komponente dar. Vorausgesetzt wird, daß 1.) die Zuschlagkomponente jeweils nur aus einer begrenzten Korngruppe gebildet wird, 2.) jede Matrix in ihrer Struktur ebenfalls ein Zweistoffsystem der eben beschriebenen Art sein kann.

Aufgrund der Voraussetzung 2.) kann das gewählte Festigkeitsmodell als ein erweitertes Zweistoffmodell bezeichnet oder anschaulich als mehrere miteinander gekoppelte Zweistoffsysteme aufgefaßt werden.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Leichtzuschlägen bisher in direkter Form nicht gelungen ist. Als leicht meßbare Größe wurde daher die Zuschlagkornrohddichte in die Untersuchungen eingeführt. Die durchgeführten Versuche hatten die Ermittlung der Druckfestigkeit des Zweistoffsystems in Abhängigkeit von der Matrixdruckfestigkeit und der Zuschlagkornrohddichte für die Korngruppen verschiedener Zuschlagtypen zum Ziel. Es wurden Einkornbetone mit dichtem Mörtelgefüge hergestellt. Als Matrix fanden Zementmörtel unterschiedlicher Druckfestigkeit Verwendung. Die Matrixdruckfestigkeit wurde über Mischungszusammensetzung und Prüfalter gesteuert. Die Zuschlagvolumenkonzentration wurde konstant gehalten.

Es kann davon ausgegangen werden, daß sich Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften der Matrix auf die Zweistoffdruckfestigkeit wesentlich stärker auswirken als evtl. auftretende Unterschiede in den elastischen Eigenschaften der Matrix, die damit in 1. Näherung vernachlässigbar sind. Geht man davon aus, daß ein Mehrkornbeton n unterschiedliche Korngruppen enthält, so kann das Zweistoffsystem, das die n -te Korngruppe als disperse Komponente enthält, als Zwei-

stoffsystem n -ter Ordnung bezeichnet werden. Entsprechend der Voraussetzung 2.) stellt dann die enthaltene Matrixkomponente das Zweistoffsystem $(n-1)$ -ter Ordnung dar. Allgemein lautet der experimentell gefundene Zusammenhang für die n -te Korngruppe:

$$\beta_n = f(\beta_{n-1}, q_n), \quad v_n = \text{const.} \quad (6)$$

Entsprechend der Näherungsannahme ist hier an die Stelle der Zementmörteldruckfestigkeit β_m die Zweistoffdruckfestigkeit β_{n-1} getreten. Die Beziehung gilt für die den Experimenten zugrunde gelegte Zuschlagvolumenkonzentration. Bei der Berechnung der Leichtbetondruckfestigkeit nach dem erweiterten Zweistoffmodell muß die mischungsabhängige Volumenkonzentration der enthaltenen Zuschlagkorngruppen in die Rechnung eingeführt werden. Wie die Vorversuche gezeigt haben, kann ein linearer Einfluß der Volumenkonzentration auf die Zweistoffdruckfestigkeit angesetzt werden. Damit ergibt sich die Rekursionsformel für das erweiterte Zweistoffmodell in allgemeiner Form zu

$$\beta_n = \frac{n_n}{v_n} \cdot f(\beta_{n-1}, q_n) + \left(1 - \frac{n_n}{v_n}\right) \cdot \beta_{n-1} \quad (7)$$

n_n mischungsabhängige Volumenkonzentration der n -ten Korngruppe

v_n die dem experimentellen Festigkeitszusammenhang für die n -te Korngruppe zugrunde liegende Volumenkonzentration

Setzt man die einzelnen Rekursionsausdrücke mit $n = 1$ beginnend nacheinander in den allgemeinen Ausdruck für β_n ein, erhält man für die Leichtbetondruckfestigkeit

$$\begin{aligned} \beta_n = & \beta_0 \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{n_k}{v_k}\right) + \frac{n_n}{v_n} \cdot f(\beta_{n-1}, q_n) \\ & + \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{n_k}{v_k} \cdot f(\beta_{k-1}, q_k) \cdot \prod_{l=k+1}^n \left(1 - \frac{n_l}{v_l}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

β_0 stellt die Druckfestigkeit des reinen Zementmörtels dar.

Die in Abschnitt 3.3 beschriebenen experimentellen Untersuchungen dienten der Bestimmung der gem. Gleichung (6) definierten Festigkeitsfunktionen. Auf graphischem Wege lassen sich aus den Versuchsergebnissen Festigkeitsdiagramme entwickeln. In Bild 9 ist ein derartiges Festigkeitsdiagramm für den Zuschlag Norlit 15 - 25 mm angegeben.

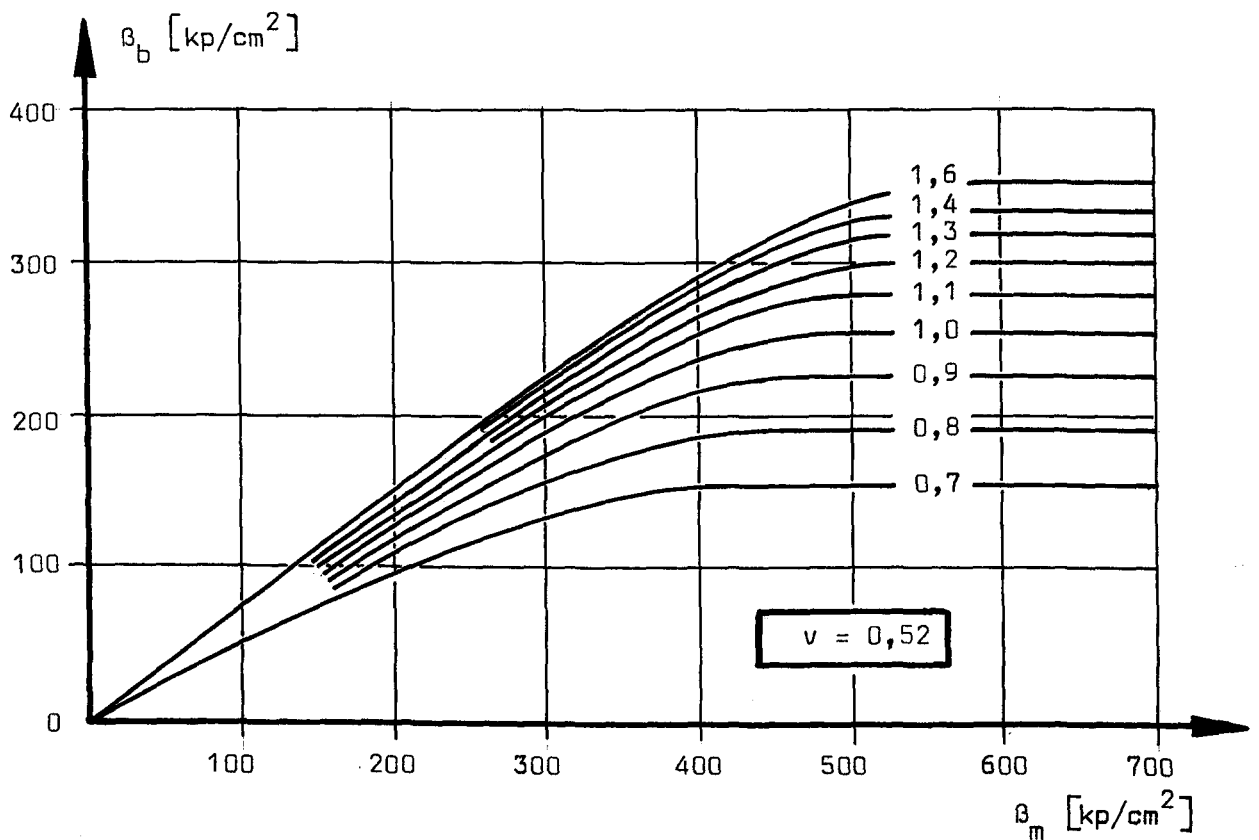


Bild 9: Festigkeitsdiagramm für Norlit 15 - 25 mm

Weitere Festigkeitsdiagramme sind in den Abb. 36 bis 43 dargestellt.

Unter Anwendung dieser Festigkeitsdiagramme wurden mit Hilfe der durch Gleichung (8) gegebenen Beziehung die in Tabelle 32 angegebenen Leichtbetone nachgerechnet, vgl. hierzu Abschnitt 3.7. Der Festigkeitseinfluß der im Mörtel enthaltenen Leichtzuschlagkorngruppe < 3 mm wurde gem. Abschnitt 3.8 experimentell bestimmt und in die Rechnung als β_1 eingeführt. Für die Detoon-Mischungen wurde die Mörteldruckfestigkeit rechnerisch anhand der Zusammensetzung abgeschätzt. In Tafel 15 sind die Ergebnisse dieser Versuchsnachrechnung zusammengestellt.

Die nachgerechneten Versuche überspannen im Hinblick auf Zementgüte, Zementgehalt, Betonalter, Betongüte und Leichtzuschlagart einen relativ weiten Bereich. Eine statistische Auswertung der in Tafel 15 angegebenen Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment ergibt für die 39 Einzelwerte nur in 4 Fällen eine Abweichung > 15 %. Im Mittel betragen die Abweichungen 2 %. Der Variationskoeffizient ergab sich zu 9,7 %. Systematische Abweichungen traten nicht auf. Die rein zufällige Natur der aufgetretenen Streuungen weist darauf hin, daß es sich hier in erster Linie um den Einfluß der Versuchsstreuungen der in die Rechnung eingehenden experimentellen Größe β_1 handelt.

Mit dem erweiterten Zweistoffmodell ist es grundsätzlich möglich, den Einfluß von Kornrohrichteveränderungen einzelner Zuschlagkorngruppen auf die Druckfestigkeit des Leichtbetons zu untersuchen [40]. Derartige Untersuchungen zeigen:

- a) Die Druckfestigkeit eines Norlitleichtbetons der Güte LB 450 mit einer N IV entsprechenden Zuschlagzusammensetzung vermindert sich um 40 %, wenn sich die Kornrohrichten der Zuschlagkorngruppen 15 - 25 mm, 7 - 15 mm und 3 - 7 mm im Mittel um 50 % verringern, unter der Voraussetzung, daß sich die Druckfestigkeit des im Leichtbeton enthaltenen Mörtelgerüsts nicht verändert. Entsprechend beträgt der Festigkeitsabfall für einen Norlitleichtbeton der Güte LB 300 noch 35 % und der Güte LB 200 ebenfalls 35 %.

Tafel 15: Nachrechnung der Leichtbetonversuche

Bezeichnung	Betonalter (Tage)	Leichtbetonmörtel β_1 [kp/cm ²]	Leichtbetondruckfestigk.		$\frac{\beta_{w,r}}{\beta_{w,exp}}$
			$\beta_{w,exp}$ [kp/cm ²]	$\beta_{w,r}$ [kp/cm ²]	
N I	3	225	183	175	0,956
	7	322	220	244	1,108
	28	403	286	306	1,070
N II	7	249	169	199	1,178
	28	390	257	305	1,158
N III 35	3	433	385	393	1,020
	7	445	436	403	0,924
	28	547	502	483	0,962
N III 36	3	433	357	387	1,083
	7	445	455	397	0,872
	28	547	431	470	1,090
N III 37	3	433	336	379	1,128
	7	445	400	390	0,975
	28	547	448	458	1,023
N III 45	3	433	327	363	1,110
	7	445	335	372	1,110
	28	547	416	439	1,052
N III 46	3	433	374	350	0,936
	7	445	409	372	0,911
	28	547	403	416	1,030
N III 47	3	433	308	334	1,083
	7	445	337	345	1,022
	28	547	412	400	0,972
N IV	15	233	195	186	0,954
	28	303	237	241	1,018
N V	3	333	266	256	0,962
	7	376	270	288	1,067
	28	444	323	333	1,031
N VI	7	261	222	217	0,977
	14	268	248	225	0,907
	28	287	266	238	0,895
L I	7	320	210	208	0,990
	28	327	220	211	0,958
L II	14	403	208	231	1,110
	28	404	235	232	0,989
L III	14	180	137	107	0,782
	28	221	164	131	0,800
D 1	28	430	450	400	0,890
D II	28	616	530	541	1,020

Vermindert sich nur die Kornrohddichte der Korngruppe 15 - 25 mm um 56 %, so sinkt die Leichtbetondruckfestigkeit um 20 %. Entsprechend bringt die Verminderung der Kornrohddichte der Korngruppe 7 - 15 mm um 61 % einen Festigkeitsabfall von 16 % und die Verminderung der Kornrohddichte der Korngruppe 3 - 7 mm um 40 % einen Festigkeitsabfall von 25 %.

- b) Unter der Voraussetzung gleicher Zuschlagvolumenkonzentration, gleicher Zuschlagkornrohddichte und Mörteldruckfestigkeit sinkt die Druckfestigkeit eines Norlitbetons der Güte LB 450 um 13 %, wenn der Größtkorndurchmesser des Zuschlags von 15 mm auf 25 mm erhöht wird.
- c) Die Druckfestigkeit eines Lecabetons der Güte LB 150 bis LB 200 und einer L II entsprechenden Zuschlagzusammensetzung vermindert sich um 20 %, wenn sich die Kornrohddichten der Zuschlagkorngruppen 15 - 20 mm, 7 - 15 mm und 3 - 7 mm im Mittel um 35 % verringern, unter der Voraussetzung, daß sich die Druckfestigkeit des im Leichtbeton enthaltenen Mörtelgerüsts nicht verändert.
- d) Die Druckfestigkeit eines Detoobetons der Güte LB 300 bis LB 500 und einer DI entsprechenden Zuschlagzusammensetzung vermindert sich um 30 %, wenn sich die Kornrohddichten der Zuschlagkorngruppen 5 - 12 mm und 2 - 5 mm im Mittel um 25 % verringern unter der Voraussetzung konstanter Mörteldruckfestigkeit.

4.2 Zusammenhang zwischen den E-Modulen von Einkorn- und Mehrkornbeton

In den Abb. 18 bis 21 ist der experimentell gefundene Zusammenhang zwischen dem E-Modul der Mörtelmatrix und den Einkornbeton-E-Modulen dargestellt. Die Anwendung der in [4] angegebenen Beziehungen unter Berücksichtigung steifer bzw. weicher Einschlüsse ergeben demgegenüber erhebliche Abweichungen. Es wurde daher bei der rechnerischen Ermittlung der E-Moduln von Mehrkornbetonen ebenfalls das erweiterte Zweistoffmodell angewendet. Die folgenden Untersuchungen beschränken sich auf einige Leichtbetone aus Norlitzschlägen.

Zu den Abb. 44 und 45 sind die graphisch gewonnenen E-Modul-Funktionen

$$E_n = f(E_{n-1}, q_n), \quad v_n = \text{const} \quad (9)$$

für Norlit dargestellt. Analog Gleichung (8) erhält man dann für den E-Modul:

$$E_n = E_0 \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{v_k}{v_n}\right) + \frac{v_n}{v_n} f(E_{n-1}, q_n) + \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{v_k}{v_n} f(E_{k-1}, q_k) \cdot \prod_{l=k+1}^n \left(1 - \frac{v_l}{v_n}\right) \right] \quad (10)$$

Grundsätzlich kann bei Leca- und Detocon-Betonen entsprechend verfahren werden.

Der untersuchte Leichtzuschlagmörtel Nm VII (Tabelle 31) setzte sich zusammen aus 48 Vol % reinem Zementmörtel M_{w0} (Tabelle 3) mit $E_0 = 215000 \text{ kp/cm}^2$ und 52 Vol % Norlit 0 - 3 mm. Der E-Modul dieses Mörtels ergab sich zu $E_1 = 247000 \text{ kp/cm}^2$. Nach [4] ergibt sich von diesen Werten ausgehend der in Bild 10 dargestellte Einfluß der Volumenkonzentration der Korngruppe 0 - 3 mm, der den weiteren Ermittlungen zugrunde gelegt wurde.

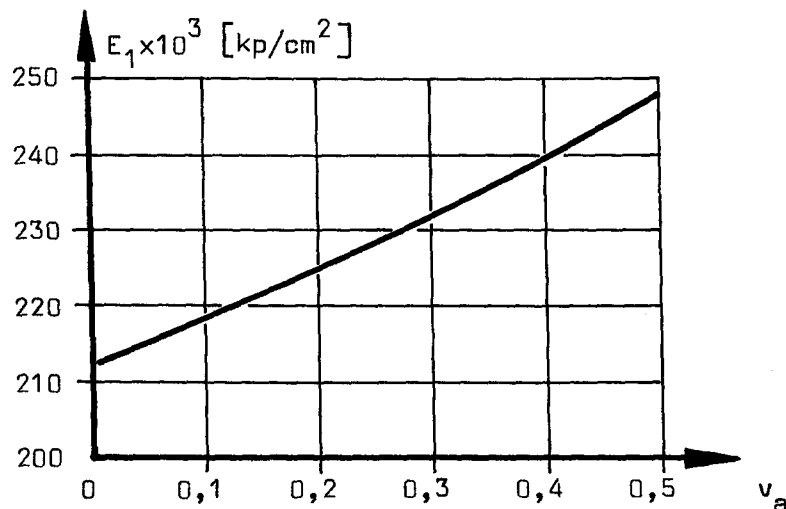


Bild 10: Einfluß der Zuschlagvolumenkonzentration auf den E-Modul des Mörtels Nm VII

Die Norlit-Mischungen N III 35 bis N III 47 enthalten den reinen Zementmörtel M_{w0} als Mischungskomponente, so daß sich unter Anwendung des in Bild 10 angegebenen Zusammenhangs die in Tafel 16 zusammengestellten rechnerischen E-Moduln ergeben. Die Durchführung der numerischen Rechnung entspricht den in [40] für die Ermittlung der Druckfestigkeit angegebenen Rechenbeispielen.

Für die Mischung N I wurde der E-Modul des Leichtbetonmörtels $Nm I$ rechnerisch aus $Nm VII$ zu $E_1 = 170400 \text{ kp/cm}^2$ ermittelt und der weiteren Rechnung zugrunde gelegt.

Tafel 16: Rechnerische E-Moduln verschiedener Leichtbetone

Bezeichnung	E-Modul des Leichtbe- tonmörtels $E_1 \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	Leichtbeton-E-Modul		$\frac{E_r}{E_{exp}}$
		E_{exp} $\text{[kp/cm}^2\text{]}$	E_r $\text{[kp/cm}^2\text{]}$	
N I	170400	162000	138000	0,849
N III 35	232000	216000	197000	0,912
N III 36	238600	217000	194500	0,896
N III 37	245000	197000	192300	0,976
N III 45	229500	198000	182000	0,919
N III 46	232000	212000	174400	0,822
N III 47	238700	198000	169000	0,854

Wie aus Tafel 16 abgelesen werden kann, ergibt das erweiterte Zweistoffsystem ohne Ausnahme zu kleine E-Moduln. Die Abweichungen betragen bis zu 18 %. Die Anzahl der durchgeführten E-Modul-Versuche an Einkorn- und Mehrkornbetonen reicht jedoch nicht aus, um dieses Ergebnis als statistisch gesichert ansehen zu können. Es besteht die Möglichkeit, das gewählte Zweistoffmodell mittels Faktoren den Versuchsergebnissen auf breiter Basis besser anzupassen. Hierzu bedarf es aber ähnlich umfangreicher Versuche, wie sie beispielsweise im

Hinblick auf die Druckfestigkeit durchgeführt wurden.

4.3 Der Zuschlagkennwert K als Grundlage zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Leichtbeton

Ein Vergleich der an den 3 verschiedenen Zuschlagtypen bestimmten Kennwerte K erlaubt die pauschale Aussage, daß Zuschläge mit großem K-Wert höhere Leichtbetondruckfestigkeiten liefern als Zuschläge mit kleinem K-Wert. Die Untersuchungen haben aber auch beispielsweise für Detoon gezeigt, daß innerhalb eines Zuschlagtyps dieser Aussage gegenüber gewisse Einschränkungen gelten können, vgl. 3.10.2. Grundsätzlich ist es möglich, den K-Wert als Grundlage für eine Festigkeitsberechnung von Leichtbeton unter der Voraussetzung heranzuziehen, daß der Zusammenhang zwischen Einkornbetondruckfestigkeit und dem experimentell ermittelten K-Wert abgeklärt ist, wie die in diesem Zusammenhang in [40] durchgeführten Untersuchungen zeigen. Eine allgemeine Beurteilung aller Leichtzuschläge hinsichtlich Kornfestigkeit und erzielbarer Leichtbetondruckfestigkeit nur mit Hilfe des Druckzylinderverfahrens und auch im speziellen Sinn mit dem daraus gewonnenen Zuschlagkennwert K kann in einigen Fällen zu einer völlig falschen Festigkeitseinstufung einiger Leichtzuschläge führen. Das Druckzylinderverfahren muß daher in jedem Einzelfall auf den zu prüfenden Zuschlagtyp gewissermaßen geeicht werden, wenn es seiner Aufgabe als Qualitätskontrolle gerecht werden soll.

5. Zusammenfassung

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurden Druckfestigkeit und E-Modul von Einkorn- und Mehrkornbetonen sowie Last-Weg-Gesetze am Zuschlaghaufwerk mittels des sog. Druckzylinderverfahrens für 3 verschiedene Leichtzuschlagtypen ermittelt. Bei den Einkornbetonversuchen wurden Korngröße und Kornrohdichte der Leichtzuschläge sowie Druckfestigkeit und E-Modul der Mörtelmatrix variiert. Die Druckzylinderversuche wurden in Abhängigkeit von Korngröße und Kornrohdichte durchgeführt. Aus den gefundenen Last-Weg-Gesetzen wurde ein Zuschlagkennwert K abgeleitet.

Die Versuchsergebnisse zeigen einen ausgeprägten Einfluß der Zuschlagkornrohddichte. Für Blähschieferzuschläge nähern sich Druckfestigkeit, E-Modul und Zuschlagkennwert K jeweils einem durch die Eigenschaften des ungeblähten Materials festgelegten Grenzwert. Blähtone weisen demgegenüber für die gleichen Zielgrößen bei bestimmten Kornrohddichten Maxima auf.

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Leichtbeton wurde ein erweitertes Zweistoffmodell entwickelt, das die Berücksichtigung der besonderen Struktur des Leichtbetons über Mischungszusammensetzung und Zuschlagkornrohddichte jeder einzelnen enthaltenen Leichtzuschlagkorngruppe ermöglicht. Unter Anwendung der experimentell bestimmten Festigkeits- und E-Modul-Funktionen der einzelnen Zuschlagkorngruppen wurden 39 Leichtbetondruckfestigkeiten 16 verschiedener Mischungen sowie 7 verschiedene E-Modul-Ergebnisse nachgerechnet. Die rechnerische Ermittlung der Druckfestigkeit ergab im Mittel eine Abweichung von 2, % gegenüber den Versuchswerten. Der Variationskoeffizient betrug 9,7 %. Systematische Abweichungen wurden nicht festgestellt. Die rechnerischen E-Moduln lagen durchweg um 3 bis 18 % unter den experimentell bestimmten Werten. Das erweiterte Zweistoffmodell ermöglicht es, den Einfluß von Mörtelfestigkeit und Zuschlagkornrohddichte jeder einzelnen enthaltenen Korngruppe auf die Leichtbetondruckfestigkeit aufzuzeigen.

Der Frage der Gütekontrolle von Leichtzuschlägen mittels eines direkten Zuschlagprüfverfahrens wurde durch Anwendung des Druckzylinderverfahrens nachgegangen. Wie gezeigt werden konnte, reagiert der aus den Last-Weg-Gesetzen abgeleitete Zuschlagkennwert K empfindlich auf Veränderung der Zuschlagkornrohddichte. Mit Abweichungen der Ergebnisse von ± 15 % vom Mittelwert muß hierbei gerechnet werden. Es sollten nicht weniger als 5 Einzelversuche pro Korngruppe durchgeführt werden. Eine Prüfung der Zuschläge < 3 mm ist mit Hilfe dieses Verfahrens nicht möglich. Es ist darauf zu achten, daß auch der in den größeren Korngruppen vorhandene Feinanteil < 3 mm vor dem Versuch ausgesiebt wird. Eine Festigkeitsaussage und ein Vergleich verschiedener Zuschläge ist über den Zuschlagkennwert nur möglich, wenn zusätzlich die Einkornbetondruck-

festigkeit in Abhängigkeit von der Kornrohddichte unter Verwendung eines hochfesten Zementmörtels ermittelt worden sind.

Ähnlich der Zementnormenprüfung sollten Leichtzuschläge für hochfeste Leichtbetone ebenfalls einer Güteprüfung unterworfen werden, die über Kornrohddichte und Zuschlagkennwert hinaus, den allgemeinen Zusammenhang von Einkornbetondruckfestigkeit und Kornrohddichte für den jeweiligen Zuschlagtyp in Form von Festigkeitsdiagrammen festlegt. Anhand dieser Festigkeitsdiagramme sind abhängig von Zementnormendruckfestigkeit und geforderter Leichtbetongüte die einzuhaltenen Mindestkornrohddichten für jede Zuschlagkorngruppe festzulegen. Stichprobenartige Festigkeitsprüfungen an Einkornbetonen, ergänzt durch laufende Kornrohddichtebestimmungen und ggf. Druckzylinderversuche, hätten die ständige Güteüberwachung zu bilden. Bei Änderung der Rohstoffe oder des Herstellverfahrens wären die Festigkeitsdiagramme neu zu ermitteln und die Anforderungen an die Kornrohddichten zu korrigieren.

Literatur-Verzeichnis

1. Stahlleichtbeton, Vorläufige Richtlinien für Ausführung und Prüfung - Fassung August 1967, Betonstein-Zeitung 1967, Heft 12.
2. Vorläufiges Merkblatt I für Stahlleichtbeton, Betonprüfung zur Überwachung der Leichtzuschläge - Fassung Juli 1968, Beton 18/1968, Heft 8.
3. Wischers, G.: Aufnahme von Druckkräften in Schwerbeton und Leichtbeton, Beton 17/1967, Heft 5.
4. Hashin, Z.: The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials, Journal of Applied Mechanics, V. 29, NO. 1, March 1962.
5. La Rue, H. A.: Modulus of Elasticity of Aggregates and its Effect on Concrete Proceedings, Am. Soc. Testing Mats., V. 46, 1946.
6. Goodier, J. N.: Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws. Trans. A.S.M.E., vol 55, 1933.
7. Hansen, T. C.: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste. Journal of the American Concrete Institute, V. 62, February 1965.
8. Trost, H.: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, Beton 16/1966, Heft 6.
9. Reissmann, K. A.: Untersuchungen an Konstruktions-Leichtbetonen, Dissertation D 17, Technische Hochschule Darmstadt, 1965.

10. Linder, A.: Statistische Methoden, 3. Auflage 1960, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, Mathematische Reihe Band 3.
11. Bache, H. H.,
Napper-Christensen, P.: Observations on Strength and Fracture in Lightweight and Ordinary Concrete. International Conference on the Structure of Concrete London, 1965, Paper B 4, Cement and Concrete Association, London.
12. Bache, H. H.: Strength of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM
13. Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Auflage, 1959, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
14. Hummel, A.: Die Ermittlung der Kornfestigkeit von Ziegelsplitt und anderen Leichtbetonzuschlagstoffen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 114, Berlin 1954.
15. Kruml, F.: The Strength of Lightweight Concretes with Compact and Porous Structure. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM.
16. Shirayama, K.: Some Considerations for Testing and Mix-Designing of Lightweight Aggregate Concrete. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM.
17. Steinicke, K.-H.: Leichtspannbeton und Leichtbeton aus Blähton und Blähschiefer. Bauverlag GmbH., Wiesbaden - Berlin, 1965.
18. Rudnai, G.: Lightweight Concretes, Akadémiai Kiadó, Budapest 1963.
19. Short, A.:
Kinniburgh, W.: Lightweight Concrete. CR Books LTD (a MacLaren Company), London, 1968
20. Ravasz, J.: Final Reports of the Symposium, RILEM 1967 Budapest, Seite 116 bis 118.

21. Bushevich, G. A.: Practice of Designing Lightweight Aggregate Concretes of Specified Properties. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM.
22. Helff, D.: The Relation Between the Grain Strength of Lightweight Aggregate and the Compressive Strength of No-Fines Lightweight Concretes. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM.
23. Helff, D.: Die Prüfung der Kornfestigkeit von Leichtzuschlagstoffen. Schriftenreihe der Bauforschung, Reihe Stahlbeton Heft 10, Neue Prüfverfahren für Beton, Berlin 1968.
24. Reinsdorf, S.: Die Prüfung des Leichtbetons aus porigen Zuschlagstoffen, Auswertungsbericht des RILEM-Symposiums, Budapest 1967. Informationen Beton 6.
25. Richtlinien für Überprüfung leichter Zuschlagstoffe. Auszug aus: Leitfaden für die Herstellung von künstlich gefertigten Zuschlägen. Ministerium für Baumaterialien UDSSR (WNJNSM), Moskau 1966. Übersetzung von P. Neumann-Venevere (unveröffentlicht).
26. Te'eni, M.: Penetration Value, A Method for Testing the Strength of Lightweight Aggregates. Proceedings of the International Symposium in Budapest 1967, RILEM.
27. Ivanov, I. A., Makradin, N. I.: Final Reports of the Symposium, RILEM 1967 Budapest, Seite 176 bis 181.
28. Manns, W.: Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Techn. Hochschule Aachen, 1969
29. Hirsch, T. J.: Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 59, March 1962.

30. Rüsç, H.:
Kordina, K.:
Hilsdorf, H.: Der Einfluß des mineralogischen Charakters
der Zuschläge auf das Kriechen von Beton,
DAfStb, Berlin 1962.
31. Waubke, N. V.: Prüfprobleme bei der Ermittlung der
"Eigenfestigkeit" und der Verbundfähigkeit
von Leichtzuschlägen für Beton.
Materialprüfung 10 (1968), Heft 3.
32. Waubke, N. V.: Untersuchungen über Dichte, Porosität und
Oberflächenbeschaffenheit von Betonleicht-
zuschlägen. (Nicht veröffentlichter Unter-
suchungsbericht des Instituts für Baustoff-
kunde und Stahlbetonbau, Abteilung Baustoff-
physik, TU Braunschweig).
33. Wischers, G.: Herstellung und Eigenschaften von Leicht-
beton hoher Festigkeit. Zement Taschen-
buch 1968/69, S. 277 bis 313, Bauverlag GmbH,
Wiesbaden - Berlin 1968.
34. Walz, K.,
Wischers, G.: Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit.
Betontechnische Berichte 1964, S. 127 - 185,
Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1965.
35. Heufers, H.,
Aurich, H.: Beitrag zur Entwicklung des konstruktiven
Leichtbetons in Deutschland.
Dyckerhoff Zement, Technisch-wissenschaft-
liche Mitteilungen 3, Dyckerhoff Zementwerke AG,
Wiesbaden - Amöneburg, Februar 1969.
36. Aurich, H.: Vorschläge zu Kornzusammensetzungen für
Leichtbeton mit dichtem Gefüge aus Leca-
Blähschiefer der Baustoffwerke Wittgenstein
GmbH & Co KG in Raumland bei Berleburg.
Verarbeitungsempfehlung B 29/65 der Beton-
technologischen Abteilung, Dyckerhoff
Zementwerke AG, Wiesbaden - Amöneburg,
Sept. 1965.
37. Protas, L. E.: Herstellung von Keramsit, SI-Verlag,
Leningrad - Moskau, 1965.
Itin, L. M.: Übersetzung von Neumann-Venevere, T-S-Reihe
Heft 4 (unveröffentlicht).

38. Henzel, J.:
Freitag, W.: Zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit
im Bauwerk mit Hilfe von Bohrkernen
kleineren Durchmessers.
beton 19 (1969), Heft 4, Seite 151 bis 155.
39. Sasse, H. R.: Zum Problem des Bruchverhaltens beton-
ähnlicher Zweistoffsysteme. Dissertation
TH Aachen, Juni 1969.
40. Schmidt-Hurtienne, K.-D.: Ein Beitrag zur Frage der Prüfung von Zu-
schlägen und der Vorausbestimmung der
Druckfestigkeit von Leichtbeton.
Dissertation TU Braunschweig 1970.

Tabelle 1: Frischbetoneigenschaften der Sieblinienbetone (Vorversuche)

Bezeichnung	Größtkorn [mm]	Volumenkonz. v	Wasseraufnahme des Zuschlags nach 7 Tagen			Zusammensetzung		Frischbetonrohdd. γ [t/m³]	Konsistenz n. Walz nach 0 Std. 1 Std.
			Gesamt- wasser [l/m³]	Kern- wasser n.3.2.2 [l/m³]	rechn. Oberfl.- Wasser [l/m³]	Z - Gehalt [kg/m³]	Verhältnis z:s:w		
Zuschlag: Norlit									
N III 35	15	0,5	149	86	63	653	1:1,376: 0,48	1,865	1,03 1,07
N III 36	15	0,6	172	102	70	521	1:1,936: 0,545	1,810	1,16 1,27
N III 37	15	0,7	175	119	56	380	1:2,87: 0,655	1,718	1,39 1,46
N III 45	25	0,5	128	85	43	659	1:1,30: 0,48	1,831	1,0 1,01
N III 46	25	0,6	154	103	51	517	1:1,826: 0,548	1,743	1,07 1,15
N III 47	25	0,7	173	119	54	384	1:2,70: 0,655	1,672	1,23 1,35
Zuschlag: Berwilit									
B III 35	15	0,5	160	61	99	645	1:1,380: 0,443	1,826	1,24 1,32
B III 36	15	0,6	173	74	99	508	1:1,940: 0,492	1,745	1,40 1,40
B III 37	15	0,7	176	86	90	367	1:2,880: 0,570	1,634	1,46 1,48
B III 45	25	0,5	120	60	60	649	1:1,260: 0,442	1,752	1,04 1,15
B III 46	25	0,6	137	72	65	519	1:1,760: 0,488	1,685	1,23 1,36
B III 47	25	0,7	150	83	67	380	1:2,605: 0,562	1,583	1,46 1,50

Tabelle 2: Festbetoneigenschaften der Sieblinienbetone (Vorversuche)
(Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften siehe Tabelle 1)

Bezeichnung	Betonrohddichte γ [t/m ³]			Würfeldruckfestigkeit β_w [kp/cm ²]			Prismen- festigk. $\beta_{p,28}$ [kp/cm ²]	E-Modul nach 28 Tagen [kp/cm ²]
	3 Tage	7 Tage	28 Tage	3 Tage	7 Tage	28 Tage		
N III 35	1,824	1,816	1,800	396	431	489	482/378	221000
				406	391	541	454	217600
				354	485	477	461	209150
		Mittel	385	436	502	444	215900	
N III 36	1,776	1,775	1,760	373	469	454	400/393	217500
				379	464	404	428	215700
				319	432	435	448	217900
		Mittel	357	455	431	417	217000	
N III 37	1,684	1,681	1,651	366	385	424	406/347	202150
				311	419	461	401	200400
				331	396	459	356	187700
		Mittel	336	400	448	378	196700	
N III 45	1,745	1,748	1,744	312	381	405	471/410	197900
				338	339	453	417	202500
				336	285	389	395	194300
		Mittel	327	335	416	423	198250	
N III 46	1,704	1,709	1,689	382	450	398	435/338	216400
				332	385	382	400	207700
				409	391	429	327	212900
		Mittel	374	409	403	375	212300	
N III 47	1,652	1,646	1,562	321	289	399	395/217	183900
				281	347	413	399	197150
				323	377	425	334	210900
		Mittel	308	337	412	334	197500	
B III 35	1,775	1,770	1,770	356	416	443	420/393	207200
				389	415	418	397	231500
				389	-	417	405	214300
		Mittel	378	415	426	404	217700	
B III 36	1,696	1,691	1,688	277	421	352	410/373	214400
				333	352	361	375	202800
				343	345	414	392	200000
		Mittel	318	373	375	388	205800	
B III 37	1,609	1,605	1,589	249	287	318	444/362	192200
				299	314	306	318	188200
				274	308	356	358	223400
		Mittel	274	303	327	371	201300	

Tabelle 2: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Betonrohddichte γ [t/m ³]			Würfeldruckfestigkeit β_w [kp/cm ²]			Prismen- festigk. $\beta_{p,28}$ [kp/cm ²]	E-Modul nach 28 Tagen [kp/cm ²]
	3 Tage	7 Tage	28 Tage	3 Tage	7 Tage	28 Tage		
B III 45	1,694	1,716	1,698	287	326	383	346/341	183000
				285	329	361	349	189100
				292	289	375	339	179100
		Mittel		288	314	373	344	183800
B III 46	1,635	1,633	1,626	249	315	361	336/327	181500
				237	274	299	330	181600
				258	239	384	336	193800
		Mittel		248	276	348	332	185600
B III 47	1,542	1,543	1,519	282	277	287	302/318	179900
				290	241	307	293	209400
				279	291	321	312	176900
		Mittel		284	270	305	306	188700

Tabelle 3: Würfeldruckfestigkeit und E-Modul des in den Sieblinienbetonen
NIII und B III (siehe Tabelle 1 u. 2) enthaltenen Zementmörtels Mw 0

Bezeichnung	Mörtelrohddichte γ [t/m ³]			Würfeldruckfestigkeit β_w [kp/cm ²]			Prismen- festigk. $\beta_{p,28}$ [kp/cm ²]	E-Modul nach 28 Tagen [kp/cm ²]
	3 Tage	7 Tage	28 Tage	3 Tage	7 Tage	28 Tage		
Mw 0	2,13	2,12	2,10	503	532	580	636	--
	2,15	2,14	2,10	535	532	660	539	216000
	2,14	2,15	2,10	480	507	607	636	214000
Mittel	2,14	2,14	2,10	506	524	616	604	215000

Tabelle 4: Kornrohddichtebestimmung

Zuschlag	Korngruppe [mm]	Kornrohddichte [g/cm ³] nach DIN 52102								Gesamt- Mittel
		Auftriebsverfahren				Flüssigkeitsver- drängungsverfahren				
		1	2	3	Mittel	1	2	3	Mittel	
Norlit	0 - 3	-	-	-	-	1,68	1,71	1,74	1,71	1,71
	3 - 7	1,42	-	-	-	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
	7 - 15	1,20	1,20	1,22	1,21	1,18	1,19	1,19	1,19	1,20
	15 - 25	1,18	1,19	1,14	1,17	1,13	1,14	1,13	1,13	1,14
Detoon	0 - 2	-	-	-	-	1,46	1,48	1,46	1,47	1,47
	2 - 5	1,27	1,26	1,26	1,26	1,26	1,25	1,25	1,25	1,26
	5 - 12	1,21	1,21	1,20	1,21	1,19	1,19	1,19	1,19	1,20
Kornrohddichte g/cm ³ nach DIN 4226 E										
Zuschlag	Korngruppe [mm]	Versuch Nr.						Mittel		
		1		2		3				
Leca	0 - 3	0,79		0,79		0,81		0,80		
	3 - 7	0,79		0,77		0,79		0,78		
	7 - 15	0,77		0,75		-		0,76		
	15 - 20	0,76		0,74		-		0,75		
Detoon	0 - 2	1,51		1,59		1,67		1,58		
	2 - 5	1,31		1,26		1,28		1,28		
	5 - 12	1,26		1,20		1,23		1,23		

Tabelle 5: Bestimmung der Schüttdichte nach DIN 52110

Zuschlag	Korngruppe [mm]	Schüttdichte [g/cm ³]							
		lose eingelaufen				eingerüttelt			
		1	2	3	Mittel	1	2	3	Mittel
Norlit	0 - 3	1,034	1,025	1,033	1,031	1,241	1,244	1,242	1,242
	3 - 7	0,700	0,696	0,692	0,696	0,851	0,838	0,841	0,843
	7 - 15	0,661	0,661	0,666	0,663	0,758	0,757	0,744	0,753
	15 - 25	0,599	0,606	0,606	0,604	0,687	0,694	0,697	0,693
Leca	0 - 3	0,616	0,622	0,619	0,619	0,745	0,746	0,742	0,744
	3 - 7	0,480	0,487	0,482	0,483	0,531	0,535	0,534	0,533
	7 - 15	0,419	0,418	0,417	0,418	0,467	0,458	0,466	0,464
	15 - 20	0,407	0,419	0,411	0,412	0,444	0,448	0,443	0,445
Detoon	2 - 5	0,692	0,725	0,698	0,705	0,767	0,762	0,798	0,776
	5 - 12	0,635	0,642	0,643	0,640	0,712	0,715	0,705	0,711

Tabelle 6: Wasseraufnahme von Leichtzuschlägen in Abhängigkeit von der Zeit der Wasserlagerung, Versuchsdurchführung nach DIN 52103

Zuschlag	Korn- gruppe [mm]	Versuch Nr.	Wasseraufnahme in Gew. % bez. auf den trockenen Zuschlag in Abhängigkeit von der Zeit (Stunden bzw. Tage)								
Norlit	0 - 3	Zeit	3 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	56 Tg.	-	-	-	-
		1	9,8	11,2	13,0	14,2	-				
		2	9,3	10,8	13,0	13,8	15,8				
		3	8,9	10,3	12,2	13,2	-				
		Mittel	9,3	10,8	12,8	13,6	-				
	3 - 7	Zeit	0,5 h	1 h	6 h	1 Tg.	2 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	56 Tg.
		1	4,6	5,2	7,2	8,5	9,6	12,2	15,3	17,8	22,0
		2	4,6	5,2	7,0	8,0	9,2	12,2	15,3	17,4	-
		3	4,7	5,2	7,2	8,4	9,2	12,0	15,6	18,0	-
		Mittel	4,6	5,2	7,1	8,3	9,3	12,2	15,4	17,7	-
	7- 15	Zeit	0,5 h	1 h	6 h	1 Tg.	2 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	62 Tg.
		1	5,2	6,2	8,2	10,3	11,5	14,2	17,1	20,4	-
		2	5,2	6,2	8,2	10,1	11,4	14,1	17,1	20,4	-
		3	5,3	6,2	8,1	10,1	11,5	14,1	17,1	20,4	25,8
		Mittel	5,2	6,2	8,2	10,1	11,5	14,1	17,1	20,4	-
	15- 25	Zeit	0,5 h	1 h	6 h	1 Tg.	2 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	68 Tg.
		1	5,2	6,2	8,3	11,0	12,8	15,8	17,2	20,2	-
		2	5,2	6,2	8,3	10,9	12,7	15,2	17,0	19,8	-
		3	5,3	6,3	8,4	11,1	12,8	15,8	17,2	20,0	25,5
		Mittel	5,2	6,2	8,3	11,0	12,8	15,5	17,2	20,0	-
Leca	0 - 3	Zeit	0,5 h	-	-	-	3 Tg.	-	-	28 Tg.	-
		1	17,7				29,6			41,6	
		2	19,7				30,8			43,0	
		3	19,8				31,5			43,2	
		Mittel	19,0				30,6			42,6	
	3 - 7	Zeit	0,5 h	-	-	-	3 Tg.	-	-	28 Tg.	-
		1	7,8				18,3			32,2	
		2	7,6				18,0			32,7	
		3	7,4				17,7			31,9	
		Mittel	7,6				18,0			32,6	
	7 - 15	Zeit	0,5 h	-	-	-	3 Tg.	-	-	28 Tg.	-
		1	8,0				22,7			32,0	
		2	7,7				17,3			28,0	
		3	8,0				17,0			27,6	
		Mittel	7,9				19,0			29,2	

Tabelle 6: (Fortsetzung)

Zuschlag	Korn- gruppe [mm]	Versuch Nr.	Wasseraufnahme in Gew. % bez. auf den trockenen Zuschlag in Abhängigkeit von der Zeit (Stunden bzw. Tage)								
Leca	15- 20	Zeit	0,5 h	-	-	-	3 Tg.	-	-	28 Tg.	-
		1	7,6				15,0			25,4	
		2	7,6				14,9			25,6	
		3	7,5				14,7			25,4	
		Mittel	7,6				14,8			25,5	
Detoon	0 - 2	Zeit	-	-	-	-	3 Tg.	7 Tg.	13 Tg.	-	-
		1					21,0	25,0	24,7		
		2					22,2	24,8	25,3		
		3					21,2	24,0	24,6		
		Mittel					21,4	24,4	24,8		
	2 - 5	Zeit	0,5 h	1 h	6 h	1 Tg.	2 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	56 Tg.
		1	9,2	9,3	11,3	14,6	16,0	20,0	23,0	26,2	-
		2	9,2	9,8	11,9	14,5	15,5	20,2	23,5	27,3	31,0
		3	9,0	9,8	12,0	14,5	15,2	20,1	24,0	27,0	-
		Mittel	9,2	9,7	11,7	14,5	15,6	20,1	23,8	27,0	-
	5- 12	Zeit	0,5 h	1 h	6 h	1 Tg.	2 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	56 Tg.
		1	9,3	10,3	13,0	16,0	17,2	20,9	23,0	26,0	-
		2	9,3	10,3	12,9	15,8	17,3	20,8	23,0	26,2	30,8
		3	9,3	10,2	12,9	15,8	17,2	20,8	22,9	26,3	-
		Mittel	9,3	10,3	12,9	15,9	17,2	20,8	23,0	26,2	-

Tabelle 7: Sättigungswassergehalt nach DIN 52103 unter einem Druck von 150 kp/cm²

Zuschlag	Versuch Nr.	Sättigungswassergehalt in Gew. % bezogen auf das trockene Zuschlaggewicht für Korngruppen mm		
		3 - 7	7 - 15	15 - 25
Norlit	1	28,0	39,6	45,0
	2	27,8	39,0	42,8
	3	28,2	39,0	43,2
	Mittel	28,0	39,2	43,7

Tabelle 8: Siebanalyse des Ausgangsmaterials

Zuschlag	Korn- gruppe [mm]	Versuch Nr.	Siebrückstände in Gew. %						
Norlit	0 - 3	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 3	3 - 5	-	-	-
		1	9,9	39,4	47,0	3,7			
		2	9,1	39,9	47,0	4,0			
		3	9,4	39,4	47,2	4,0			
		Mittel	9,4	39,6	47,1	3,9			
	3 - 7	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 3	3 - 5	5 - 7	7 - 10	-
		1	0,5	0,8	9,3	67,9	21,0	0,5	
		2	0,2	0,3	9,6	67,6	21,5	0,8	
		3	0,4	0,8	9,1	67,4	21,5	0,8	
		Mittel	0,4	0,7	9,3	67,6	21,3	0,7	
	7- 15	Sieb	-	5	5 - 7	7 - 10	10-12,5	12,5-15	15 - 30
		1		0,8	1,2	29,0	36,1	25,5	7,4
		2		1,0	1,0	29,0	36,5	25,1	7,4
		3		0,8	1,0	29,0	36,6	25,1	7,5
		Mittel		0,9	1,1	29,0	36,4	25,2	7,4
	15- 25	Sieb	-	7	7- 10	10-12,5	12,5-15	15-16	16 - 30
		1		1,0	0,1	0,3	7,8	13,0	77,8
		2		1,0	0,1	0,4	7,7	13,1	77,7
		3		1,0	0,2	0,4	7,8	12,9	77,7
		Mittel		1,0	0,1	0,3	7,8	13,0	77,7
Leca	0 - 3	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 3	3 - 5	-	-	-
		1	13,5	26,0	52,0	8,5			
		2	14,5	25,7	51,8	8,0			
		3	13,5	25,5	52,8	8,2			
		Mittel	13,8	25,8	52,2	8,2			
	3 - 7	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 3	3 - 5	5 - 7	7 - 10	10-12,5
		1	0,5	0,1	2,5	30,3	48,0	18,3	0,3
		2	0,4	0,1	2,5	28,9	48,5	19,2	0,4
		3	0,3	0,1	3,0	30,5	49,1	16,7	0,3
		Mittel	0,4	0,1	2,7	29,9	48,5	18,1	0,3
	7- 15	Sieb	-	5	5 - 7	7 - 10	10-12,5	12,5-15	15 - 30
		1		0,4	0,7	13,4	23,2	38,0	24,3
		2		0,4	0,8	16,2	25,3	36,3	21,0
		3		0,5	0,9	11,0	22,9	39,7	25,0
		Mittel		0,4	0,8	13,4	23,8	38,0	23,4

Tabelle 8: (Fortsetzung)

Zuschlag	Korn- gruppe [mm]	Versuch Nr.	Siebrückstände in Gew. %						
Leca	15- 20	Sieb	-	-	10	10-12,5	12,5-15	15 - 16	16 - 30
		1			0,6	2,0	8,9	6,0	82,5
		2			1,2	3,5	13,6	9,2	72,5
		3			0,5	1,5	7,7	5,7	84,6
		Mittel			0,7	2,3	10,1	7,0	79,9
Detoon	0 - 2	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 2	-	-	-	-
		1	14,6	44,0	41,4				
		2	15,0	44,6	40,4				
		3	14,6	44,8	40,6				
		Mittel	14,7	44,5	40,8				
	2 - 5	Sieb	0-0,2	0,2-1	1 - 3	3 - 5	5 - 7	-	-
		1	1,9	10,8	9,1	75,9	2,3		
		2	3,1	9,6	8,9	75,9	2,5		
		3	2,8	9,9	8,7	76,5	2,1		
		Mittel	2,6	10,1	8,9	76,1	2,3		
	5- 12	Sieb	3	3- 5	5 - 7	7 - 10	10-12,5	12,5-15	-
		1	1,5	9,1	29,0	57,0	3,3	0,1	
		2	1,4	8,3	30,4	56,8	2,8	0,3	
		3	2,5	8,1	30,9	54,8	3,5	0,2	
		Mittel	1,8	8,5	30,1	56,2	3,2	0,2	

Tabelle 9: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Norlit	7	M 1	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit σ_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel- Bezeichn. σ_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.1	0,8-1,0	136,0	74	197,5	1,450	0,952	0,572	291	—	M 1.7
		136,0	74	195,0	1,433	0,938	0,580	302	571	
		141,0	78	195,0	1,382	0,909	0,609	254	—	
		142,0	72	203,5	1,432	0,900	0,563	282		
		138,0	75	195,5	1,418	0,924	0,588	296		
		138,5	81	193,0	1,395	0,945	0,619	270		
	Mittel				1,418	0,928	0,588	283		
N 1.2	0,8-1,0	138,7	74	200,0	1,442	0,934	0,572	347	116000	M 1.26 631 164000
N 1.3	0,8-1,0	137,4	77	195,0	1,419	0,942	0,595	—	109000	—
N 1.4	1,0-1,2	138,0	91,0	213	1,542	1,131	0,583	384	—	M 1.6
		135,0	89	218	1,613	1,200	0,549	388	602	
		138,0	97	212	1,538	1,158	0,607	441	—	
		140,0	92	215	1,538	1,122	0,586	410		
		137,5	89	212	1,540	1,120	0,578	384		
	139,0	87	216	1,553	1,113	0,562	411			
Mittel				1,554	1,141	0,578	403			
N 1.5	1,0-1,2	134,3	82	212	1,579	1,124	0,544	448	150000	M 1.26 631 164000
N 1.6	1,0-1,2	136,4	97	205	1,503	1,135	0,627	—	124000	—
N 1.7	1,2-1,4	139,0	104	231,5	1,665	1,319	0,567	525	—	M 1.8
		137,4	103	224,0	1,630	1,282	0,585	479	526	
		139,1	100	232,0	1,668	1,301	0,552	480	—	

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel - Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.7	1,2-1,4	142,6	104	236,0	1,655	1,295	0,563	531		M 1.8 526 -
		136,9	104	228,0	1,665	1,326	0,573	485		
		142,9	102	238,0	1,666	1,295	0,551	559		
	Mittel				1,658	1,303	0,565	510		
N 1.8	1,2-1,4	142,9	109	233,5	1,634	1,295	0,589	502		M 1.5 498 -
		140,2	102	227,5	1,623	1,259	0,578	521		
		138,2	107	231,0	1,671	1,342	0,577	484		
		137,4	100	231,0	1,681	1,323	0,550	467		
		140,5	102	233,0	1,658	1,296	0,560	466		
		142,8	103	233,0	1,632	1,264	0,571	459		
	Mittel				1,650	1,297	0,571	483		
N 1.9	1,2-1,4	142,8	105	235,0	1,646	1,289	0,571	500	168000	M 1.26 631 164000
N 1.10	1,2-1,4	139,1	103	230,0	1,653	1,301	0,569		148000	
N 1.11	1,4-1,6	137,4	108	247,0	1,798	1,503	0,523	650		M 1.3 601 -
		139,8	103	248,5	1,778	1,447	0,509	522		
		141,6	99	259,0	1,829	1,497	0,467	570		
		136,3	108	245,5	1,801	1,512	0,524	561		
		138,6	110	253,5	1,829	1,551	0,512	637		
	Mittel				1,807	1,502	0,507	588		
N 1.12	1,4-1,6	140,7	123	247,5	1,759	1,500	0,583	620		M 1.4 555 -
		138,7	120	245,5	1,770	1,509	0,573	682		
		138,3	112	246,0	1,779	1,491	0,543	682		
		138,7	117	253,0	1,824	1,569	0,538	581		
		138,6	120	243,0	1,753	1,489	0,581	603		
		142,3	111	248,0	1,743	1,429	0,546	592		
	Mittel				1,771	1,498	0,561	626		
N 1.13	1,4-1,6	137,9	119	244	1,769	1,508	0,573	552	188000	
N 1.14	1,4-1,6	139,5	121	243	1,742	1,476	0,588		173000	
N 1.15	1,4-1,6	128,7	93	230	1,787	1,451	0,498	700	188000	M 1.35 621 182300
		128,3	95	229	1,785	1,459	0,507	640	186500	
		Mittel				1,786	1,455	0,503	670	187000

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel- Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.16	>1,6	140,1	113	279	1,991	1,829	0,441	572		M 1.1 608 -
		137,1	115	277	2,020	1,895	0,443	536		
		137,2	114	276	2,012	1,875	0,443	492		
		139,9	128	273	1,951	1,790	0,511	493		
		136,2	120	274	2,012	1,888	0,467	553		
		Mittel				1,997	1,855	0,461	529	
	N 1.17	>1,6	142,6	156	287	2,013	1,931	0,567	592	
139,5			149	282	2,022	1,941	0,550	586		
141,4			145	284	2,008	1,912	0,536	603		
143,4			147	286	1,994	1,889	0,543	560		
145,4			146	287	1,974	1,850	0,543	620		
142,2			145	286	2,011	1,916	0,532	525		
Mittel					2,004	1,875	0,556	580		
N 1.18	>1,6	136,3	145	276	2,025	1,946	0,547	552	166000	
N 1.19	>1,6	-	137	271	-	-	-	600	179000	
		-	138	272	-	-	-	667	166000	
	Mittel							633	173000	
Korngruppe 7 - 15 mm										
N 2.1	<0,8	112	47,5	156	1,393	0,781	0,543	173		
		106	44,0	149	1,406	0,778	0,533	189		
	Mittel				1,400	0,780	0,538	181		
N 2.2	<0,8	137,8	56,0	190	1,379	0,751	0,541	195	89000	M 1.9 609 -
		138,4	56,0	185	1,337	0,722	0,560	179	84000	
	Mittel				1,358	0,736	0,551	187	86500	
N 2.3	0,8-1,0	112	52,0	166	1,482	0,893	0,520	257		
		110	50,5	166	1,509	0,910	0,505	224		
		108	52,0	160	1,481	0,911	0,528	220		
		108	48,0	164	1,519	0,901	0,493	244		
	Mittel				1,498	0,904	0,512	236		
N 2.4	0,8-1,0	142,9	71	208	1,456	0,907	0,548	275	99000	M 1.9 609 -
		138,6	75	205	1,479	0,971	0,558	280	105000	
	Mittel				1,468	0,939	0,553	277	102000	

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel - Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 7 - 15 mm										
N 2.5	1,0-1,2	100,9	64,0					316		
		99,7	61,0					296		
		99,7	64,0					337		
		98,5	61,0					317		
		98,5	61,0					314		
		101,7	61,0					314		
	Mittel							316		
N 2.6	1,0-1,2	143,0	91,0	219	1,531	1,101	0,578	305	91000	
		140,4	91,0	212	1,510	1,092	0,594	345	111000	
	Mittel				1,521	1,097	0,586	325	101000	
N 2.7	1,0-1,2	110,0	58,0	181	1,645	1,116	0,473	366		
		108,0	59,0	173	1,602	1,089	0,502	333		
		108,0	59,0	172	1,593	1,079	0,507	330		
		108,0	58,0	177	1,639	1,118	0,480	340		
		120,0	61,0	196	1,633	1,083	0,469	308		
	Mittel				1,622	1,097	0,486	335		
N 2.8	1,2-1,4	99,1	72,0	161	1,625	1,261	0,576	400		
		98,1	72,0	164	1,672	1,316	0,558	433		
		98,6	70,0	161	1,633	1,257	0,565	404		
		99,1	72,0	162	1,635	1,271	0,572	403		
		98,5	69,5	160	1,624	1,245	0,567	367		
		100,3	71,0	163	1,625	1,248	0,567	385		
	Mittel				1,636	1,266	0,567	399		
N 2.9	1,2-1,4	139,7	106,0	232	1,661	1,321	0,575	394	117000	
		141,2	107,0	230	1,629	1,286	0,589	385	125000	
	Mittel				1,645	1,303	0,582	389	121000	
N 2.10	1,4-1,6	110,0	78,0	200	1,818	1,487	0,477	416		
		110,0	80,0	196	1,782	1,447	0,503	406		
		114,0	81,0	208	1,825	1,497	0,475	403		
		108,0	81,5	194	1,796	1,484	0,509	429		
		116,0	77,0	210	1,810	1,446	0,459	419		
		112,0	80,5	203	1,813	1,485	0,484	431		
	Mittel				1,807	1,474	0,484	417		
N 2.11	1,4-1,6	136,7	118,0	245	1,792	1,537	0,562	440	163000	M 1.9 609 —
		138,8	121,5	246,5	1,776	1,522	0,575	435	140000	
	Mittel				1,784	1,529	0,569	437	152000	

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E		
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v					
Korngruppe 7 - 15 mm												
N 2.12	1,4-1,6	139,5 137,5	125,0 122,0	244 244	1,743 1,775	1,499 1,526	0,598 0,582	452 466	167000 169000	M 1.33 699 189000		
	Mittel				1,759	1,513	0,590	459	168000			
N 2.13	>1,6	111,9 108,0 111,9 106,0 111,9 113,9	100,0 97,5 101,0 98,0 103,5 102,5	227 219 226 216 229 229	2,029 2,028 2,020 2,038 2,046 2,011	1,923 1,924 1,908 1,947 1,964 1,890	0,465 0,469 0,473 0,475 0,471 0,476	440 514 486 524 488 467				
		Mittel				2,029	1,926	0,472	486			
N 2.14	>1,6	142,4 142,0	148,0 145,0	277 279	1,945 1,963	1,815 1,840	0,573 0,555	475 552	173000 177000	M 1.33 699 189000		
	Mittel				1,953	1,828	0,564	513	175000			
N 2.15	>1,6	140,9 139,0	144,0 144,0	272 273	1,930 1,964	1,788 1,843	0,572 0,562	520 510				
	Mittel				1,947	1,815	0,567	515				
Korngruppe 15 - 25 mm												
N 3.1	<0,8	137,4 137,1 138,5 141,1 137,6	41,0 47,0 49,0 52,0 45,0	195 186 191 197 196	1,419 1,357 1,379 1,396 1,424	0,633 0,657 0,685 0,715 0,678	0,471 0,522 0,516 0,515 0,482	128 150 154 140 150		M 1.13 625 —		
		Mittel				1,395	0,674	0,501	145			
N 3.2	<0,8	142,4 145,1	48,5 51,5	196 197	1,376 1,358	0,666 0,673	0,512 0,527		87000 93000	M 1.14 — 153000		
	Mittel				1,367	0,670	0,519		90000			
N 3.3	<0,8	137,9	50,0	184	1,334	0,669	0,542		63000			
N 3.4	0,8-1,0	139,0 135,4 138,9 141,2 136,9 138,0	64,0 67,0 75,0 70,0 63,0 66,0	208 196 209 205 205 202	1,496 1,448 1,505 1,452 1,497 1,464	0,900 0,899 0,991 0,903 0,901 0,894	0,511 0,551 0,545 0,549 0,511 0,535	234 206 217 240 238 206		M 1.12 556 —		
		Mittel				1,477	0,915	0,534	224			

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 15 - 25 mm										
N 3.5	0,8-1,0	137,4	64,0	204	1,485	0,897	0,519		89000	M 1.14 - 153000
N 3.6	0,8-1,0	138,1	71,0	203	1,470	0,936	0,549		86000	
N 3.7	1,0-1,2	136,3	69,0	223	1,636	1,084	0,467	297		M 1.12 556 -
		141,7	81,0	220	1,553	1,064	0,537	296		
		137,3	76,0	219	1,595	1,088	0,509	276		
		142,2	79,0	222	1,561	1,043	0,529	272		
		140,7	83,0	219	1,557	1,084	0,544	293		
	Mittel				1,580	1,073	0,517	287		
N 3.8	1,0-1,2	138,4	84,0	214	1,545	1,090	0,557	306	107000	M 1.33 699 189000
		142,7	82,0	224	1,565	1,083	0,531	242	107000	
	Mittel				1,555	1,086	0,544	274		
N 3.9	1,0-1,2	142,4	79,0	221	1,552	1,047	0,530		116000	
N 3.10	1,2-1,4	138,2	87,0	232	1,679	1,246	0,505	320		M 1.11 621 -
		140,1	86,0	232	1,656	1,207	0,509	294		
		139,5	91,0	234	1,677	1,263	0,517	324		
		138,6	86,0	234	1,688	1,250	0,496	297		
		138,4	91,0	230	1,662	1,249	0,526	326		
		135,5	85,0	230	1,697	1,267	0,495	321		
	Mittel				1,677	1,247	0,508	314		
N 3.11	1,2-1,4	140,0	91,0	232	1,650	1,238	0,525	399	137000	M 1.33 699 189000
		137,4	93,0	225	1,636	1,238	0,547	266	109000	
	Mittel				1,643	1,238	0,536	332	123000	
N 3.12	1,2-1,4	141,7	90,0	232	1,637	1,205	0,527		131000	
		138,5	89,0	232	1,675	1,253	0,513		145000	
	Mittel				1,656	1,229	0,520		138000	
N 3.13	1,4-1,6	138,0	111,0	250	1,812	1,532	0,525	389		M 1.10 532 -
		135,4	109,0	253	1,869	1,615	0,498	368		
		141,6	114,0	262	1,850	1,588	0,507	361		
		137,6	107,0	253	1,839	1,557	0,500	349		
		137,4	110,0	250	1,820	1,541	0,519	350		
	Mittel				1,838	1,567	0,510	363		

Tabelle 9: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 15 - 25 mm										
N 3.14	1,4-1,6	143,2	114,0	259	1,812	1,524	0,522	342	137000	M 1.33 699 189000
		142,9	111,0	253	1,764	1,462	0,531	379	147000	
	Mittel				1,788	1,493	0,527	361	142000	
N 3.15	1,4-1,6	140,4	114,0	249	1,774	1,486	0,547		159000	
N 3.16	1,4-1,6	142,5	127,0	254	1,782	1,538	0,580		152000	

Tabelle 10: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
L e c a	7	M 1	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohdichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
L 1.1	0,6-0,8	138,5	63	180	1,300	0,756	0,602	232		M 1.16 518 —
		141,3	63	180	1,274	0,732	0,610	220		
		141,6	63	180	1,271	0,729	0,610	223		
		139,0	64	183	1,317	0,772	0,596	224		
		137,4	63	178	1,295	0,758	0,605	239		
		139,7	61	182	1,303	0,738	0,592	235		
	Mittel				1,293	0,747	0,602	229		

Tabelle 10: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β _b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β _m E		
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ _b [g/cm ³]	ρ _r [g/cm ³]	v					
Korngruppe 3 - 7 mm												
L 1.2	0,6-0,8	138,5 137,0	53 61	197,5 186,0	1,426 1,358	0,753 0,782	0,508 0,570	227 218	92000 86000	M 1.35 621 182300		
	Mittel				1,392	0,768	0,539	223	89000			
L 1.3	0,6-0,8	137,9	58	184,0	1,334	0,739	0,569		89000			
L 1.4	0,6-0,8	140,3	62	181,0	1,290	0,737	0,600		82000			
L 1.5	0,8-1,0	139,3 135,6 143,6 151,8 139,4 140,0	69 65 70 70 69 69	196,0 199,0 200,0 204,0 198,0 201,0	1,407 1,468 1,393 1,344 1,420 1,436	0,869 0,898 0,851 0,790 0,878 0,888	0,570 0,534 0,573 0,584 0,564 0,555	318 311 309 282 296 318		M 1.10 532 —		
		Mittel				1,411	0,862	0,563	306			
	L 1.6	0,8-1,0	139,7 142,2	68 69	203,0 207,5	1,453 1,459	0,894 0,898	0,544 0,541	335 323	108500 113300	M 1.35 621 182300	
Mittel						1,456	0,896	0,542	329	110900		
L 1.7	0,8-1,0	137,8 140,5	70 69	195,0 201,0	1,415 1,431	0,888 0,882	0,572 0,557		106000 110000			
		Mittel				1,423	0,885	0,565			108000	
L 1.8	1,0-1,2	139,3 136,7 146,8 139,0 141,6 141,4	83 82 82 82 82 82	215,0 211,0 226,0 221,0 217,0 220,0	1,543 1,544 1,540 1,590 1,532 1,556	1,077 1,081 1,040 1,117 1,052 1,075	0,553 0,555 0,537 0,528 0,550 0,540	404 423 371 443 376 401		M 1.15 577 —		
		Mittel				1,551	1,074	0,544	403			
L 1.9	1,0-1,2	147,9	90	227,0	1,535	1,081	0,563		124000			
Korngruppe 7 - 15 mm												
L 2.1	<0,6	137,4 141,1 139,7 138,7 139,9	47 49 46 46 48	174,0 186,0 183,0 183,0 180,0	1,266 1,318 1,310 1,319 1,287	0,606 0,641 0,613 0,621 0,618	0,564 0,542 0,538 0,534 0,555	143 159 174 147 160		M 1.15 577 —		
		Mittel				1,300	0,620	0,547	157			

Tabelle 10: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_b E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 7 - 15 mm										
L 2.2	0,6-0,8	142,0	55	191,0	1,345	0,706	0,548	204		M 1.18 566 —
		136,7	54	190,0	1,390	0,744	0,531	215		
		138,6	58	191,0	1,378	0,765	0,547	211		
		136,7	55	191,0	1,397	0,758	0,531	223		
		143,1	57	189,0	1,321	0,705	0,565	213		
		136,2	57	185,0	1,358	0,752	0,557	206		
	Mittel				1,365	0,738	0,547	212		
	L 2.3	0,6-0,8	143,6	53	182,0	1,267	0,640	0,576		80000 85000
136,0			52	180,0	1,324	0,688	0,556			
Mittel					1,296	0,664	0,566		82500	
L 2.4	0,8-1,0	140,5	65	202,0	1,438	0,857	0,540	253		M 1.17 545 —
		137,9	61	207,0	1,501	0,884	0,501	276		
		137,1	65	199,0	1,451	0,880	0,539	251		
		141,8	66	207,0	1,460	0,877	0,531	246		
		142,8	65	202,0	1,415	0,831	0,548	244		
		142,4	66	202,0	1,419	0,843	0,550	244		
	Mittel				1,447	0,862	0,535	251		
	L 2.5	0,8-1,0	140,2	65	195,0	1,391	0,824	0,563		100000 86000
142,9			63	200,0	1,400	0,805	0,548			
Mittel					1,396	0,814	0,555		93000	
L 2.6	1,0-1,2	140,4	83	223,5	1,592	1,120	0,528	284		M 1.17 545 —
		136,7	75	217,0	1,587	1,076	0,510	296		
		136,4	77	222,0	1,628	1,132	0,499	263		
		139,6	79	220,0	1,576	1,081	0,524	264		
		138,4	78	222,0	1,604	1,107	0,509	323		
		138,8	74	222,0	1,599	1,073	0,497	347		
	Mittel				1,598	1,098	0,511	312		

Tabelle 10: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	G _r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 15 - 20 mm										
L 3.1	< 0,6	139,4	42	180,0	1,291	0,565	0,533	130		M 1.19 536 —
		138,4	40	178,5	1,290	0,547	0,528	144		
		136,4	49	179,0	1,312	0,653	0,551	156		
	Mittel				1,298	0,588	0,537	143		
L 3.2	0,6-0,8	137,7	58	196,0	1,423	0,799	0,527	197		M 1.19 536 —
		136,3	55	195,0	1,431	0,783	0,516	175		
		138,1	57	191,0	1,383	0,761	0,542	180		
		137,4	55	194,0	1,412	0,766	0,523	186		
		139,3	56	195,0	1,400	0,759	0,529	181		
		137,8	55	193,0	1,401	0,756	0,528	184		
	Mittel				1,408	0,771	0,528	184		
L 3.3	0,6-0,8	137,6	52	186,0	1,352	0,699	0,541		68000 71000	
		139,0	51	189,0	1,360	0,690	0,532			
	Mittel				1,356	0,694	0,536		69500	
L 3.4	0,8-1,0	143,8	62	209,0	1,453	0,833	0,518	195		M 1.2 540 —
		139,6	57	210,0	1,504	0,845	0,483	208		
		144,5	63	211,0	1,460	0,844	0,517	194		
		138,4	65	205,0	1,481	0,898	0,523	208		
		139,3	60	202,0	1,450	0,830	0,519	206		
		139,1	62	201,0	1,445	0,843	0,529	199		
	Mittel				1,466	0,849	0,515	202		
L 3.5	0,8-1,0	137,4	56	199,0	1,448	0,801	0,509		53000	
L 3.6	0,8-1,0	140,7	60	212,0	1,507	0,870	0,491		76000	M 1.14 153000

Tabelle 11: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel		Bemerkung						
Detoon	7	M 1		Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte						

Be- zeich- nung	Korn- roh- dicke- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 2 - 5 mm										
D 1.1	1,0-1,2	137,4	91	221,0	1,608	1,196	0,554	487		M 1.21 567 -
		138,2	93	221,0	1,599	1,195	0,563	497		
		139,1	93	224,0	1,610	1,203	0,556	416		
		137,7	91	223,0	1,619	1,206	0,548	503		
		136,3	92	222,0	1,629	1,227	0,550	462		
	Mittel				1,613	1,205	0,554	472		
D 1.2	1,0-1,2		82	226,0					143000	
			83	232,0					135000	
	Mittel								139000	
D 1.3	1,2-1,4	140,3	98	241,0	1,718	1,345	0,519	680		M 1.20 638 -
		138,8	96	239,0	1,722	1,346	0,514	580		
		138,2	102	240,0	1,737	1,395	0,529	647		
		142,0	100	253,0	1,782	1,432	0,492	645		
		140,8	96	241,0	1,712	1,326	0,514	684		
		140,3	98	241,5	1,721	1,350	0,518	649		
	Mittel				1,732	1,366	0,514	648		
D 1.4	1,2-1,4	138,0	100	236,0	1,710	1,354	0,535		150000	
		139,3	98	238,0	1,709	1,338	0,526		144000	
	Mittel				1,710	1,346	0,531		147000	
D 1.5	1,4-1,6	140,3	105	263,5	1,878	1,602	0,467	793		M 1.20 638 -
		143,2	97	264,0	1,844	1,506	0,450	674		
		136,4	104	258,5	1,895	1,637	0,466	851		
		136,4	100	261,0	1,913	1,654	0,443	707		
		139,7	102	261,0	1,868	1,577	0,463	789		
		142,1	103	264,0	1,858	1,557	0,466	794		
	Mittel				1,876	1,589	0,459	767		
D 1.6	1,4-1,6	141,8	110	257,0	1,812	1,518	0,511		179000	
		139,7	105	256,0	1,832	1,533	0,490		190000	
	Mittel				1,822	1,526	0,501		185000	

Tabelle 11: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 2 - 5 mm										
D 1.7	1,4-1,6	142,7	103	268,0	1,878	1,588	0,455	780	190000	M 1.27
		138,2	98	262,0	1,896	1,611	0,440	787	186000	605
	Mittel				1,887	1,599	0,447	783	188000	-
Korngruppe 5 - 12 mm										
D 2.1	1,0-1,2	142,6	91	222,5	1,560	1,129	0,565	424		M 1.25
		137,1	90	220,0	1,605	1,188	0,553	456		539
		138,3	90	220,0	1,591	1,169	0,557	503		-
		141,7	93	224,5	1,584	1,167	0,562	468		
		136,7	90	218,0	1,595	1,179	0,558	453		
		136,2	90	220,0	1,615	1,202	0,550	516		
	Mittel				1,592	1,172	0,558	470		
D 2.2	1,0-1,2	141,0	90	227,0	1,610	1,178	0,542		141000	
		138,5	89	223,0	1,610	1,182	0,544		145000	
	Mittel				1,610	1,180	0,543		143000	
D 2.3	1,2-1,4	138,6	104	237,0	1,710	1,371	0,547	619		M 1.24
		138,1	107	232,0	1,680	1,352	0,573	593		584
		139,8	108	234,0	1,674	1,344	0,575	594		-
		137,1	106	236,0	1,721	1,399	0,553	596		
		136,2	103	232,5	1,707	1,371	0,552	614		
		138,7	105	235,0	1,694	1,357	0,558	554		
	Mittel				1,698	1,366	0,560	595		
D 2.4	1,2-1,4	138,6	97	234,0	1,688	1,311	0,534		133000	
		139,6	97	234,6	1,681	1,299	0,535		136000	
	Mittel				1,685	1,305	0,534		135000	
D 2.5	1,2-1,4	140,2	92	239,0	1,705	1,298	0,506	630	153000	M 1.27
		137,1	90	235,0	1,714	1,310	0,501	614	153000	605
	Mittel				1,710	1,304	0,503	622	153000	-

Tabelle 11: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β _b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β _m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ _b [g/cm ³]	ρ _r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 5 - 12 mm										
D 2.6	1,4-1,6	141,6	118	254,0	1,794	1,524	0,547	652		M 1,23 626 -
		137,4	120	247,0	1,798	1,548	0,564	688		
		141,0	117	252,0	1,787	1,513	0,548	683		
		139,6	118	253,0	1,812	1,554	0,544	660		
		140,4	118	253,0	1,802	1,538	0,547	584		
		140,0	119	257,0	1,836	1,589	0,535	661		
	Mittel				1,805	1,544	0,548	655		
D 2.7	1,4-1,6	139,3	105	251,5	1,805	1,496	0,504		153000	
		135,8	100	248,0	1,826	1,515	0,486		151000	
	Mittel				1,816	1,506	0,495		152000	
D 2.8	>1,6	143,0	147	283,0	1,979	1,864	0,551	559		M 1.22 546 -
		140,6	145	284,0	2,020	1,932	0,534	530		
		140,8	142	282,0	2,003	1,899	0,531	505		
		138,9	145	286,0	2,059	2,003	0,521	547		
		143,7	140	288,0	2,004	1,895	0,514	540		
		140,2	142	285,0	2,033	1,952	0,519	503		
	Mittel				2,016	1,924	0,528	531		
D 2.9	>1,6	139,6	124	276,5	1,981	1,833	0,485	415	144000	
		143,7	124	282,0	1,962	1,793	0,481	461	146000	
	Mittel				1,972	1,813	0,483	438	145000	
D 2.10	>1,6	141,9	127	274,5	1,934	1,756	0,510		156000	M 1.14
		138,2	125	278,0	2,012	1,893	0,478		135000	-
	Mittel				1,973	1,824	0,494		146000	153000

Tabelle 12: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Norlit	7	M 2	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dicke- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit σ_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. σ_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.30	1,2-1,4	138,3	101	240	1,735	1,389	0,526	255	114000	M 2.1 285 111000
		135,4	107	229	1,691	1,374	0,575	306		
		141,7	108	236	1,665	1,328	0,574	-		
	Mittel				1,697	1,364	0,558	280		
Korngruppe 7 - 15 mm										
N 2.30	>1,6	139,4	150	275	1,973	1,865	0,577	296	169000	M 2.1 285 111000
		140,2	149	274	1,954	1,834	0,580	296		
		138,2	147	273	1,975	1,866	0,570	306		
	Mittel				1,967	1,855	0,576	300		
Korngruppe 15 - 25 mm										
N 3.30	0,8-1,0	141,7	66	214	1,510	0,918	0,507	151	79000	M 2.5 235 100000
		138,6	67	204	1,472	0,906	0,534	178		
		140,0	68	203	1,450	0,891	0,545	158		
	Mittel				1,477	0,905	0,529	162		

Tabelle 13: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel		Bemerkung						
L e c a	7	M 2		Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte						

Be- zeich- nung	Korn- roh- dicke- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β _b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β _m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ _b [g/cm ³]	ρ _r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
L 1.30	0,8-1,0	138,0	68	198	1,435	0,887	0,556	197	74000	M 2.5 235 100000
		139,7	68	200	1,432	0,878	0,554	192		
		138,2	67	199	1,440	0,882	0,550	175		
	Mittel				1,436	0,882	0,553	188		
Korngruppe 7 - 15 mm										
L 2.30	0,8-1,0	141,3	66	203	1,437	0,861	0,543	146	48000	M 2.4 260 105000
		139,0	61	204	1,468	0,853	0,515	184		
		139,0	60	204	1,468	0,844	0,511	148		
	Mittel				1,458	0,852	0,523	159		
Korngruppe 15 - 20 mm										
L 3.30	0,6-0,8	139,3	49	199	1,429	0,715	0,492	126	45500	M 2.4 260 105000
		142,9	54	200	1,400	0,729	0,518	118		
		139,5	49	200	1,434	0,718	0,490	121		
	Mittel				1,421	0,721	0,500	122		

Tabelle 14: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Detoon	7	M 2	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 2 - 5 mm										
D 1.30	1,4-1,6	132,1	109	245,0	1,855	1,604	0,514	442	143600	M 2.6 234 89000
		135,6	108	252,0	1,858	1,596	0,499	376		
		138,0	95	264,0	1,913	1,630	0,422	359		
	Mittel				1,875	1,610	0,479	393		
Korngruppe 5 - 12 mm										
D 2.30	1,4-1,6	139,1	112	253,5	1,822	1,548	0,520	338	137000	M 2.6 234 89000
		136,3	109	250,0	1,834	1,562	0,512	366		
		138,0	108	254,0	1,841	1,562	0,501	406		
	Mittel				1,832	1,557	0,511			

Tabelle 15: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Norlit	3	M 3	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.60	1,2-1,4	137,1	111	224,0	1,634	1,345	0,602	190	93000 90000	M 3.1 219 94000
		138,7	110	224,0	1,615	1,315	0,603	194		
		139,7	108	224,0	1,603	1,291	0,599	217		
		137,4	109	224,0	1,630	1,332	0,596	213		
		138,8	107	226,5	1,632	1,320	0,584	193		
	Mittel				1,623	1,321	0,597	201	91500	
Korngruppe 7 - 15 mm										
N 2.60	0,8-1,0	139,4	73	192,0	1,377	0,891	0,588	122	61000 66000	M 3.2 209 102000
		142,6	75	195,0	1,367	0,886	0,594	144		
		142,6	73	196,5	1,378	0,880	0,582	148		
		141,6	75	195,0	1,377	0,897	0,591	145		
		142,0	73	197,5	1,391	0,888	0,575	148		
	Mittel				1,378	0,889	0,586	141	63500	
N 2.61	>1,6	138,7	152	272,0	1,961	1,883	0,582	182	120000 136000	M 3,3 202 102000
		140,8	148	268,0	1,903	1,787	0,588	169		
		141,7	147	276,0	1,948	1,852	0,560	190		
		151,4	158	285,0	1,882	1,755	0,595	183		
		138,8	148	270,0	1,945	1,853	0,575	217		
	Mittel				1,928	1,826	0,580	189	128000	

Tabelle 15: (Fortsetzung)

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 15 - 25 mm										
N 3.60	0,8-1,0	142,8	68	208,0	1,457	0,905	0,526	122	59000 67000	M 3.4 218 102000
		143,0	68	206,0	1,441	0,891	0,534	143		
		142,2	70	206,5	1,452	0,918	0,536	138		
		142,2	66	206,0	1,449	0,885	0,524	143		
		142,2	68	207,0	1,456	0,906	0,528	145		
	Mittel				1,451	0,901	0,530	138	63000	
Verlauf der Bruchfläche durch 60 bis 70 % der vorhandenen Zuschlagkörner										
N 3.61	1,4-1,6	140,4	99	250,0	1,781	1,468	0,481	152	109000 92000	M 3.4 218 102000
		142,6	107	252,0	1,767	1,475	0,509	173		
		144,9	105	248,5	1,715	1,389	0,522	182		
		143,7	107	253,5	1,764	1,467	0,508	179		
		137,4	99	245,0	1,783	1,481	0,487	147		
	Mittel				1,762	1,456	0,501	167	101000	
Verlauf der Bruchfläche durch 20 bis 30 % der vorhandenen Zuschlagkörner										

Tabelle 16: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
L e c a	3	M 3	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dicke- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
L 1.60	0,6-0,8	138,7	60	180	1,298	0,743	0,582	128	56000	M 3.5
		141,6	64	180	1,271	0,748	0,604	113	58000	230
		138,9	61	187	1,346	0,782	0,562	112		119000
		139,2	61	180	1,293	0,747	0,587	116		
		139,5	61	179	1,283	0,739	0,591	102		
	Mittel				1,298	0,752	0,585	114	57000	
Korngruppe 7 - 15 mm.										
L 260	0,8-1,0	139,3	61	203	1,457	0,863	0,508	141	70000	M 3.6
		137,1	64	197	1,437	0,879	0,531	128	51000	205
		146,8	63	210	1,431	0,831	0,516	120		—
		142,8	65	203	1,422	0,854	0,533	135		
		139,4	60	206	1,478	0,871	0,494	142		
	Mittel				1,445	0,859	0,517	133	60000	
Korngruppe 15 - 20 mm										
L 3.60 ^{*)}	0,6-0,8	148,6	58	195	1,312	0,704	0,555	128	59000	M 3.11 ^{*)}
		142,2	56	192	1,350	0,732	0,538	153	64000	299
		142,6	59	188	1,318	0,735	0,563	133		140000
		137,0	55	189	1,380	0,761	0,528	139		
		142,1	56	193	1,358	0,738	0,534	138		
	Mittel				1,344	0,734	0,544	138	62000	
^{*)} Fehler in der Mörtelmischung, Auswertung der Serie L 3.60 daher im Zusammenhang mit den Ergebnissen von Tabelle 13										

Tabelle 17: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Detoon	3	M 3	Versuche in Abhängigkeit von der Kornrohddichte

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 2 - 5 mm										
D 1.60	1,4-1,6	143,7	122	259,0	1,802	1,574	0,540	272	120000	M 3.7 215 109000
		138,6	119	251,0	1,811	1,590	0,540	270	105000	
		142,2	118	254,5	1,790	1,547	0,536	260		
		141,0	118	252,0	1,787	1,547	0,541	244		
		138,5	106	252,5	1,823	1,565	0,489	247		
	Mittel				1,803	1,565	0,529	259	113000	
Korngruppe 5 - 12 mm										
D 2.60	1,4-1,6	139,2	115	250,0	1,797	1,560	0,530	272		M 3.8 240 103000
		134,1	112	242,5	1,811	1,581	0,528	259		
		141,9	116	254,0	1,786	1,540	0,530	262		
		141,0	117	253,0	1,788	1,548	0,535	250	117000	
		138,6	115	251,0	1,805	1,573	0,527	310	153000	
	Mittel				1,797	1,560	0,530	271	135000	
D 2.61	>1,6	138,4	135	272,5	1,966	1,876	0,520	219		M 3.9 237 97000
		138,7	135	274,5	1,975	1,889	0,515	202		
		139,1	135	274,0	1,970	1,880	0,516	211		
		141,2	137	277,0	1,963	1,870	0,520	222	130000	
		137,4	134	270,0	1,963	1,870	0,521	206	110000	
	Mittel				1,967	1,877	0,518	212	120000	

Tabelle 18: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Norlit	7	M 1	Versuche mit Ausgangsmaterial

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V	G _a	G _b	γ_b	ρ_r	v			
		[cm ³]	[g]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]				
Korngruppe 3 - 7 mm										
N 1.90		103,7 108,0	81,0 76,0					594 588		
	Mittel							591		
N 1.91		140,3 142,7 140,4 143,7	110,0 110,5 107,0 107,0	244,0 257,0 244,0 253,0	1,739 1,801 1,738 1,761	1,427 1,501 1,412 1,430	0,550 0,516 0,540 0,521	530 626 561 608	132000 139000 135500	M 1.14 - 153000
	Mittel				1,760	1,443	0,531	580		
Korngruppe 7 - 15 mm										
N 2.90		101,8 103,7	77,0 80,5					380 328		
	Mittel							354		
N 2.91		142,6 138,0	100,0 102,0	238,0 237,5	1,669 1,721	1,290 1,377	0,544 0,537	375 406	108000 141000	M 1.28 665 -
	Mittel				1,695	1,333	0,540	390	125000	
	Korngruppe 15 - 25 mm									
N 3.90		110,0 103,7	71,0 77,0					305 303		
	Mittel							304		
N 3.91		137,1 141,2	79,0 81,0	216,5 218,0	1,579 1,544	1,094 1,058	0,527 0,542	287 271	111000 114000	M 1.28 665 -
	Mittel				1,562	1,076	0,535	279	112000	

Tabelle 19: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel						Bemerkung		
L e c a	7	M 1						Versuche mit Ausgangsmaterial		

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit σ_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. σ_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
L 1.90		138,0	71,0	198,0	1,435	0,909	0,566	298		M 1.31 579 —
		136,9	70,0	196,0	1,432	0,904	0,566	270		
		140,5	73,0	204,0	1,452	0,927	0,560	272	96000	
		145,2	79,0	206,0	1,419	0,926	0,588	—	116000	
	Mittel				1,435	0,916	0,570	280	106000	
Korngruppe 7 - 15 mm										
L 2.90		138,6	64,0	194,0	1,400	0,825	0,560	213	91000	M 1.29 655 —
		142,6	59,0	202,0	1,417	0,790	0,525	228	87000	
	Mittel				1,409	0,805	0,542	220	89000	
Korngruppe 15 - 20 mm										
L 3.90		142,4	59,0	205,5	1,443	0,805	0,515	189		M 1.29 655 —
		137,1	54,0	205,0	1,495	0,820	0,481	209		
		145,6	57,5	206,5	1,418	0,763	0,517	200	99000	
	Mittel				1,452	0,796	0,504	199		

Tabelle 20: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Detoon	7	M 1	Versuche mit Ausgangsmaterial

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V	G _a	G _b	γ_b	ρ_r	v			
		[cm ³]	[g]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]				
Korngruppe 2 - 5 mm										
D 1.90		140,6	98,0	244,0	1,735	1,366	0,510	645		M 1.30 666 —
		144,1	106,0	247,0	1,714	1,366	0,539	606		
		142,1	95,0	242,5	1,707	1,310	0,510	575	157000	
		142,8	97,0	251,5	1,761	1,387	0,490	632	169000	
	Mittel				1,729	1,357	0,512	614	163000	
Korngruppe 5 - 12 mm										
D 2.90		110,0	64,5					497		
		110,0	66,0					479		
	Mittel							488		
D 2.91		138,1	100,0	253,0	1,832	1,517	0,478	578		M 1.34 612 —
		136,7	102,0	252,0	1,843	1,547	0,483	512		
		139,7	103,0	256,5	1,836	1,531	0,482	535	194000	
		142,8	104,0	260,0	1,821	1,503	0,485	532	157000	
	Mittel				1,833	1,524	0,482	539	175000	

Tabelle 21: Ergebnisse der Einkornbetonversuche

Zuschlag	Prüfalter (Tage)	Mörtel	Bemerkung
Naturkies	7	M 1	---

Be- zeich- nung	Korn- roh- dichte- klasse [g/cm ³]	Prüfkörper						Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	Mörtel Bezeichn. β_m E
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			
Korngruppe 3 - 7 mm										
K 1.1		139,1	211	334,5	2,40	2,61	0,580	445		M 1.32 611 181000
		138,1	210	330,5	2,39	2,57	0,590	435		
		141,9	210	339,0	2,39	2,59	0,572	452		
		138,2	209	329,0	2,38	2,57	0,590	404	178000	
		142,9	210	337,0	2,35	2,52	0,582	372	178000	
	Mittel				2,38	2,57	0,582	421	178000	
Korngruppe 7 - 15 mm										
K 2.1		139,1	199	330,0	2,37	2,58	0,555	332		M 1.32 611 181000
		135,8	200	323,5	2,38	2,57	0,572	412		
		140,9	200	333,0	2,37	2,56	0,555	364		
		140,1	205	336,5	2,40	2,62	0,556	330	172000	
	Mittel				2,38	2,58	0,560	359		
Korngruppe 15 - 30 mm										
K 3.1		137,0	180	323,0	2,35	2,57	0,508	384		M 1.32 611 181000
		140,0	176	328,0	2,34	2,57	0,488	281		
		139,2	186	328,0	2,36	2,58	0,518	288	103000	
		140,3	175	326,0	2,32	2,52	0,493	342	133000	
	Mittel				2,34	2,56	0,502	324	118000	

Tabelle 22: Einkornbetonversuche für Naturkies mit Mörtel niederer Festigkeit (Mörtel M 4)

Be- zeich- nung	Korn- gruppe [mm]	Prüfkörper						Prüf- alter (Tage)	Druck- festig- keit β_b [kp/cm ²]	Mörtel	
		V [cm ³]	G _a [g]	G _b [g]	γ_b [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v			Be- zeich- nung	Druck- festig- keit β_m
K 2.2	7/15	137	213	317	2,315	2,529	0,615	3	105	M 4.1	115
		136	184	313	2,303	2,609	0,519	3	77		
		141	193	323	2,290	2,573	0,532	3	87		
								Mittel	90		
		140	185	318	2,270	2,552	0,518	7	125		194
		137	193	313	2,283	2,537	0,555	7	134		
		138	199	315	2,282	2,515	0,573	7	151		
								Mittel	137		
		136	191	306	2,250	2,461	0,571	28	154		254
		137	180	311	2,271	2,553	0,515	28	170		
		139	191	315	2,266	2,511	0,547	28	151		
	Mittel				2,281	2,538	0,549	Mittel	158		
K 3.2	15/30	137	174	312	2,278	2,599	0,489	3	120	M 4.1	115
		140	173	316	2,258	2,566	0,482	3	89		
								Mittel	105		
		145	179	320	2,206	2,438	0,506	7	134		194
		139	169	309	2,222	2,488	0,489	7	151		
		139	178	316	2,271	2,582	0,496	7	126		
								Mittel	137		
		140	164	311	2,221	2,508	0,467	28	158		254
		140	175	314	2,242	2,520	0,496	28	170		
		140	175	313	2,237	2,502	0,499	28	155		
	Mittel				2,242	2,525	0,491	Mittel	161		

Tabelle 23: Würfeldruckfestigkeit von Einkornbetonen (Vergleichsversuche)
mit Mörtel M 1, Prüfalter: 7 Tage, Prüfkörper: Würfel mit
20 cm Kantenlänge

Be- zeich- nung	Zuschlag G_a	γ_b nach 24 Std. [g/cm ³]	ρ_r [g/cm ³]	v	$\gamma_{b,7}$ [g/cm ³]	Druck festig- keit $\beta_{w,7}$ [kp/cm ²]	Mörtel	
							Bezeich- nung	Druck- festigkeit β_m [kp/cm ²]
L e c a 7 - 15 mm, Kornrohddichte 0,6 - 0,8 g/cm ³								
Lw 1.1	3,15	1,342	0,714	0,550	1,348	232	Mw 1.1	435
	2,95	1,382	0,708	0,520	1,392	227		
	Mittel	1,362	0,711	0,530	1,370	229		
L e c a 15 - 20 mm, Kornrohddichte 0,6-0,8 g/cm ³								
L w 2.1	2,93	1,416	0,725	0,505	1,420	240	Mw 1.1	435
	3,00	1,380	0,715	0,525	1,390	235		
	Mittel	1,398	0,720	0,515	1,400	237		
Detoon 5 - 12 mm, Kornrohddichte 1,2 - 1,4 g/cm ³								
Dw 2.1	5,06	1,750	1,340	0,472	1,756	567	Mw 1.1	435
Naturkies (getrocknet), 7 - 15 mm								
Kw 2.1	12,46	2,375	2,540	0,610	2,390	407	Mw 1.2	444
	12,28	2,390	2,580	0,594	2,410	446		
	13,14	2,400	2,560	0,640	2,410	429		
	Mittel	2,388	2,560	0,615	2,400	427		
Naturkies (getrocknet) 15 - 30 mm								
Kw 3.1	12,58	2,400	2,580	0,610	2,410	408	Mw 1.2	444
	12,24	2,390	2,575	0,593	2,400	413		
	12,40	2,390	2,575	0,602	2,410	410		
	Mittel	2,393	2,577	0,602	2,410	410		

Tabelle 24: Mörtel M 1 - Versuchsergebnisse

Prüfkörper: Zylinder, Durchmesser 50 mm, Höhe 70 mm

Bezeichnung	Mörtelrohdichte γ_m [g/cm ³]		Druckfestigk. n. 7 Tg. β_m [kp/cm ²]		E-Modul nach 7 Tg. [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.	Einzelwerte	Mittel	Einzelwerte	Mittel
M 1.1	2,135 2,130 2,135	2,120 2,125 2,120	597 605 622	608		
M 1.2	2,195 2,157	2,160 2,110	555 525	540		
M 1.3	2,148 2,111 2,180	2,114 2,085 2,150	637 588 578	601		
M 1.4	2,162 2,105	2,125 2,080	539 571	555		
M 1.5	2,081 2,135 2,172	2,048 2,112 2,128	474 508 514	498		
M 1.6	2,144 2,159 2,136	2,129 2,136 2,106	564 649 594	602		
M 1.7	2,180 2,140 2,175	2,155 2,115 2,150	574 545 593	571		
M 1.8	2,150 2,127	2,124 2,109	474 579	526		
M 1.9	2,141 2,157	2,116 2,131	612 607	609		
M 1.10	2,221 2,172	2,162 2,102	530 535	532		
M 1.11	2,127 2,124 2,136	2,105 2,102 2,099	663 627 574	621		

Tabelle 24: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Mörtelrohdichte γ_m [g/cm ³]		Druckfestigk. n. 7 Tg. β_m [kp/cm ²]		E-Modul nach 7 Tg. [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.	Einzelwerte	Mittel	Einzelwerte	Mittel
M 1.12	2,126 2,086 2,147	2,097 2,068 2,125	573 546 549	556		
M 1.13	2,152 2,180 2,130	2,122 2,150 2,107	550 675 650	625		
M 1.14	2,126 2,136	2,110 2,110	--	--	159000 148000	153000
M 1.15	2,200 2,193 2,208	2,155 2,156 2,185	537 647 548	577		
M 1.16	2,174 2,164 2,149	2,123 2,126 2,134	500 517 536	518		
M 1.17	2,195 2,225 2,183	2,154 2,172 2,131	583 564 487	545		
M 1.18	2,218 2,170 2,216	2,173 2,155 2,150	554 567 578	566		
M 1.19	2,197	2,167	536			
M 1.20	2,174 2,157 2,143	2,133 2,113 2,118	656 626 630	638		
M 1.21	2,144 2,164 2,145	2,115 2,134 2,075	554 596 552	567		
M 1.22	2,215 2,173 2,174	2,155 2,108 2,122	542 503 592	546		

Tabelle 24: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Mörtelrohddichte γ_m [g/cm ³]		Druckfestigk. n. 7 Tg. β_m [kp/cm ²]		E-Modul nach 7 Tg. [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.	Einzelwerte	Mittel	Einzelwerte	Mittel
M 1.23	2,150 2,166 2,180	2,124 2,140 2,135	642 626 611	626		
M 1.24	2,136 2,140	2,099 2,103	586 583	584		
M 1.25	2,169 2,148 2,103	2,111 2,111 2,064	530 521 565	539		
M 1.26	2,151 2,156 2,137	2,121 2,126 2,093	570 644 680	631	171000 160000 161000	164000
M 1.27	2,117	2,080	605			
M 1.28	2,152	2,141	665			
M 1.29	2,132 2,160	2,103 2,137	681 629	655		
M 1.30	2,184	2,128	666			
M 1.31	2,142	2,113	579			
M 1.32	2,185 2,150 2,144	2,120 2,110 2,080	634 510 690	611	181000	
M 1.33	2,128 2,100	2,080 2,060	703 695	699	193000 184000	189000
M 1.34	2,144	2,118	612			
M 1.35	2,172 2,138 2,129	2,113 2,116 2,114	655 571 638	621	184500 180000	182300
M 1.36	2,121 2,115 2,102	2,080 2,120 2,070	548 499 485	511		

Tabelle 25: Mörtel M 1 - Würfel- und Prismenfestigkeit,
E - Modul
Prüfkörper: Würfel mit 20 cm Kantenlänge
Prismen 10/10/55 cm

Bezeich- nung	Mörtelrohddichte γ_m [g/cm ³]			Druckfestigk. n. 7 Tg.		E-Modul nach 7 Tagen [kp/cm ²]
	frisch	n.24 Std.	n.7 Tg.	Würfel	Prisma	
				β_w [kp/cm ²]	β_p [kp/cm ²]	
Mw 1.1	2,11	2,065	2,075	390	532	180000 200000 190000
	2,11	2,075	2,090	480	473	
					520	
		Mittel		435	508	
Mw 1.2	2,12	2,065	2,070	427		
	2,12	2,070	2,080	452		
		Mittel		444		

Tabelle 26: Mörtel M 2 - Versuchsergebnisse

Prüfkörper: Zylinder, Durchmesser 50 mm, Höhe 70 mm

Bezeichnung	Mörtelrohdichte γ_m [g/cm ³]		Druckfestigk. n. 7 Tg. β_m [kp/cm ²]		E-Modul nach 7 Tg. [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.	Einzelwerte	Mittel	Einzelwerte	Mittel
M 2.1	2,232 2,196 2,170	2,150 2,145 2,130	280 302 273	285	111000	
M 2.2	2,166 2,138 2,166 2,183 2,182 2,184	2,128 2,093 2,108 2,117 2,114 2,132	283 266 244 265 270	266	120000 110000	115000
M 2.3	2,150 2,151 2,182 2,169 2,152 2,165	2,105 2,097 2,121 2,109 2,096 2,105	287 281 287 296 280 290	287		
M 2.4	2,170 2,160	2,117 2,119	253 267	260	105000	
M 2.5	2,162 2,167 2,150	2,115 2,130 2,120	246 227 233	235	100000	
M 2.6	2,183 2,204	2,124 2,112	232 236	234	89000	

Tabelle 27: Mörtel M 3 - Versuchsergebnisse

Prüfkörper: Zylinder, Durchmesser 50 mm, Höhe 70 mm

Bezeichnung	Mörtelrohdichte γ_m [g/cm ³]		Druckfestigk. n. 7 Tg. β_m [kp/cm ²]		E-Modul nach 7 Tg. [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.	Einzelwerte	Mittel	Einzelwerte	Mittel
M 3.1	2,190 2,271	2,090 2,157	216 222	219	94000	
M 3.2	2,117 2,122	2,070 2,040	191 226	209	102000	
M 3.3	2,189 2,111	2,105 2,050	224 181	202	102000	
M 3.4	2,135 2,158 2,129 2,161	2,070 1,940 2,050 2,090	203 234 217 217	218	100000 103000	102000
M 3.5	2,148 2,124	2,060 2,040	244 217	230		
M 3.6	2,193 2,124	2,120 2,070	203 208	205		
M 3.7	2,194 2,125	2,096 2,063	209 222	215	109000	
M 3.8	2,153 2,155	2,060 2,080	251 229	240	103000	
M 3.9	2,174 2,152	2,100 2,080	242 232	237	97000	
M 3.10	2,140 2,133 2,142	2,095 2,045 2,095	207 210 212	210	82000	
M 3.11 *)	2,172 2,169	2,119 2,124	304 294	299	140000	

*) Mischungsfehler. Diese Serie wird nicht in die Gesamtauswertung einbezogen.

Tabelle 28: Mörtel M 4 - Versuchsergebnisse

Prüfkörper: Zylinder, Durchmesser 50 mm, Höhe 70 mm

Bezeichnung	Mörtelrohddichte γ_m [g/cm ³]		Prüfalter (Tage)	Druckfestigkeit β_m [kp/cm ²]	
	frisch	n. 24 Std.		Einzelwerte	Mittel
M 4.1	2,040	1,960	3	119	115
	2,060	2,000	3	119	
	2,020	1,985	3	106	
	2,120	1,970	7	195	194
	2,045	1,964	7	192	
	2,000	1,952	7	194	
	2,046	1,965	28	258	254
	2,033	1,980	28	250	
	1,985	1,978	28	254	

Tabelle 29: Ergebnisse der Zementnormenprüfungen

Zementgüte	Prüfung Nr.	Druckfestigkeit N [kp/cm ²] Prüfalter (Tage)			Biegezugfestigkeit [kp/cm ²] (Prüfalter (Tage))		
		3	7	28	3	7	28
PZ 275 A	Mittel	304	411	489	52	68	89
PZ 375 A	1	312/299	431/449	589/585	58,0	75,5	93,5
		290/309	446/436	573/592	54,8	81,7	96,1
		304/299	448/448	591/573	61,0	75,7	91,2
	Mittel	302	443	584	57,9	77,6	93,6
	2	315/321	416/443	520/557	55,3	82,4	92,3
		330/321	438/440	587/539	55,4	77,6	86,4
		322/326	428/432	549/542	60,5	81,9	87,3
	Mittel	323	433	549	57,1	80,6	88,6
	3	328/314	475/460	587/595	56,7	78,8	91,3
		330/319	475/479	628/583	54,5	76,0	94,7
		318/313	456/471	630/591	59,4	84,1	90,6
	Mittel	320	469	602	56,9	79,6	92,2
	4	338/354	458/477	514/514	60,0	69,7	94,7
		341/356	458/457	522/532	65,1	78,9	88,7
		360/351	477/457	514/518	60,2	80,2	91,4
	Mittel	350	464	519	61,8	76,3	91,6
PZ 275 H	1	245/253	349/336	426/424	52,2	64,5	76,6
		256/256	334/359	422/414	50,0	62,8	76,4
		252/240	345/343	424/426	51,1	60,6	74,7
	Mittel	251	344	423	51,1	62,6	75,9
HOZ 275 W	1	143/137	242/246	390/378	32,7	49,3	78,1
		140/149	246/236	383/389	32,2	50,6	75,6
		142/147	240/241	384/389	29,9	51,8	74,7
	Mittel	143	242	386	31,6	50,6	76,1
HOZ 275 T	1	125/120	184/181	300/293	25,8	39,9	62,7
		117/124	177/181	295/316	25,5	40,8	62,5
		118/116	183/179	307/287	27,9	39,8	60,7
	Mittel	120	181	300	26,4	40,2	62,0
	2	102/100	178/177	296/318	21,7	38,8	61,6
		101/109	181/178	322/296	21,6	35,9	67,9
		101/102	177/174	322/324	21,6	37,1	67,0
	Mittel	102	178	313	21,6	37,3	65,5

Tabelle 30: Zusammensetzung der Leichtzuschlagmörtel verschiedener Leichtbetone

Bezeichnung	Leichtzuschlag LZ		Zement Z Feinsand FS Korngruppe Rohdichte	Mischungsverhältnis Z : FS : LZ : W	Frischmörtelroh- dichte (Mittel) \uparrow_m [g/cm ³]
	Typ Korngr. [mm]	Kornrohd. [g/cm ³] Vol.-Konz. n			
Nm I	Norlit 0 - 3	1,71 0,391	PZ 275 A Normens. I 0 - 0,2 2,635	1 : 0,617 : 1,526 : 0,71	
	Der Wassergehalt wurde um 5 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton N I enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Nm II	Norlit 0 - 3	1,71 0,391	H0Z 275 W Normens. I 0 - 0,2 2,635	1 : 0,537 : 1,456 : 0,67	1,874
	Der Wassergehalt wurde um 5 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton N II enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Nm III	Norlit 0 - 3	1,71 0,30	PZ 375 A Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,25 : 0,563 : 0,377	1,946
	Der Wassergehalt wurde zur Berücksichtigung des Wassersaugens um 5 Gew. % des im Mörtel Nm III enthaltenen trocken zugegebenen Leichtzuschlags 0 - 3 mm erhöht, da die Leichtzuschläge der zugeh. Leichtbetone N III 35 bis N III 47 7 Tage in Wasser gelagert worden waren und für sie ein Wassersaugen weitgehend ausgeschaltet wurde.				

Tabelle 30: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Leichtzuschlag LZ		Zement Z Feinsand FS Korngruppe Rohdichte	Mischungs- verhältnis Z : FS : LZ : W	Frisch- mörtelroh- dichte (Mittel) δ_m [g/cm ³]
	Typ Korngr. [mm]	Kornrohd. [g/cm ³] Vol.-Konz. n			
Nm IV	Norlit 0 - 3	1,71 0,391	HOZ 275 T Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,483 : 1,396 : 0,644	1,830
	Der Wassergehalt wurde um 5 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton N IV enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Nm V	Natur- kies 0 - 3	2,635 0,508	PZ 275 A -	1 : - : 2,15 : 0,452	-
	Der Wassergehalt wurde um 5 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton N V enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Nm VI	Norlit 0 - 3	1,71 0,39	PZ 275 A Normens. I 0 - 0,2 2,635	1 : 0,616 : 1,525 : 0,78	1,970
	Der Wassergehalt wurde um 5 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton N VI enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Nm VII	Norlit 0 - 3	1,71 0,53	PZ 375 A Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,249 : 1,48 : 0,35	1,953
	Der im Mörtel enthaltene Leichtzuschlag 0 - 3 mm wurde 7 Tage in Wasser gelagert.				

Tabelle 30: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Leichtzuschlag LZ		Zement Z Feinsand FS Korngruppe Rohdichte	Mischungsverhältnis Z : FS : LZ : W	Frischmörtelroh- dichte (Mittel) γ_m [g/cm ³]
	Typ Korngr. [mm]	Kornrohd. [g/cm ³] Vol.-Konz. n			
Lm I	Leca 0 - 3	1,35 0,404	PZ 275 A Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,433 : 0,973 : 0,48	1,610
	Der Wassergehalt wurde um 7,6 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton L I enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
L m II	Leca 0 - 3	1,35 0,395	PZ 275 H Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,313 : 0,964 : 0,533	1,613
	Der Wassergehalt wurde um 7,6 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton L II enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				
Lm III	Leca 0 - 3	1,35 0,380	HOZ 275 T Quarzsand 0 - 0,2 2,635	1 : 0,398 : 1,0 : 0,648	1,507
	Der Wassergehalt wurde um 7,6 Gew. % des im zugeh. Leichtbeton L III enthaltenen Leichtzuschlags > 3 mm Korngröße reduziert zur Abschätzung der durch diesen Zuschlaganteil aufgesaugten Wassermenge.				

Tabelle 31: Eigenschaften der Leichtzuschlagmörtel verschiedener Leichtbetone

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Mörtel- rohdichte γ_m [g/cm ³]	Würfeldruck- festigkeit β_w [kp/cm ²]	Zugehöriger Leichtbeton
Nm I	3	1,900	217	N I
	3	1,890	220	
	3	1,920	238	
	Mittel	1,903	225	
	7	1,900	325	
	7	1,890	315	
	7	1,890	325	
	Mittel	1,893	322	
	28	1,860	442	
	28	1,860	372	
	28	1,860	395	
	Mittel	1,860	403	
Nm II	7	1,855	257	N II
	7	1,880	235	
	7	1,865	255	
	Mittel	1,867	249	
	28	-	407	
	28	-	369	
	28	-	394	
	Mittel	-	390	
Nm III	3	1,940	430	N III 35 bis N III 47
	3	1,920	420	
	3	1,920	450	
	Mittel	1,927	433	
	7	1,918	445	
	7	1,920	395	
	7	1,918	382	
	Mittel	1,919	407	
	28	1,900	545	
	28	1,900	545	
	28	1,910	550	
	Mittel	1,903	547	

Tabelle 31: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Mörtel- rohdichte γ_m [g/cm ³]	Würfeldruck- festigkeit β_w [kp/cm ²]	Zugehöriger Leichtbeton
Nm IV	15	1,760	232	N IV
	15	1,760	232	
	15	1,750	235	
	Mittel	1,757	233	
	28	1,750	307	
	28	1,740	289	
	28	1,730	313	
	Mittel	1,740	303	
Nm V	3	2,230	337	N V
	3	2,250	345	
	3	2,250	317	
	Mittel	2,243	333	
	7	2,240	355	
	7	2,240	392	
	7	2,230	382	
	Mittel	2,237	376	
	28	--	430	
	28	--	455	
	28	--	447	
	Mittel	--	444	
Nm VI	7	1,930	260	N VI
	7	1,960	252	
	7	1,940	270	
	Mittel	1,943	261	
	14	1,890	255	
	14	1,910	270	
	14	1,920	280	
	Mittel	1,907	268	
	28	1,890	287	
	28	1,870	292	
	28	1,880	282	
	Mittel	1,880	287	

Tabelle 31: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Mörtel- rohddichte γ_m [g/cm ³]	Würfeldruck- festigkeit β_w [kp/cm ²]	Zugehöriger Leichtbeton
Nm VII	3	1,904	508	N III 35 bis N III 47
	3	1,899	467	
	3	1,931	443	
	Mittel	1,911	473	
	7	1,905	482	
	7	1,900	563	
	7	1,915	438	
	Mittel	1,907	494	
	28	1,884	610	
	28	1,895	611	
	28	1,895	631	
	Mittel	1,891	617	
	Ergebnisse an Prismen 15 x 15 x 70 cm			
	Prüfalter (Tage)	Druckfestigkeit β_p [kp/cm ²]	E-Modul [kp/cm ²]	
	28	539		
	28	557	268000	
	28	581	231000	
	28	551	242000	
	Mittel	557	247000	

Tabelle 31: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Mörtel- rohdichte γ_m [g/cm ³]	Würfeldruck- festigkeit β_w [kp/cm ²]	Zugehöriger Leichtbeton
Lm I	7	1,59	322	L I
	7	1,59	330	
	7	1,60	308	
	Mittel	1,59	320	
	28	1,57	335	
	28	1,59	307	
	28	1,57	320	
	Mittel	1,58	327	
Lm II	14	1,56	417	L II
	14	1,57	402	
	14	1,57	392	
	Mittel	1,57	404	
	28	1,56	412	
	28	1,57	400	
	28	1,57	400	
	Mittel	1,57	404	
Lm III	14	1,44	180	L III
	14	1,42	187	
	14	1,44	172	
	Mittel	1,43	180	
	28	1,42	207	
	28	1,41	232	
	28	1,42	225	
	Mittel	1,42	221	

Tabelle 32: Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der untersuchten Leichtbetone

(v_0 , v_{30} Verdichtungsmaß nach 0 und 30 Minuten)

Bezeichnung	Zement Z	Z-Geh. ange- strebt vorh. [kg/m ³]	Zuschlag S	Korn- gruppe [mm]	S - Gehalt [kg/m ³]	Mischungs- verhältnis z : s : w	γ_r $\gamma_{\text{vorh.}}$ [g/cm ³]	v_0 v_{30}
N I	PZ 275 A	230 234	Normens.I Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-25	142 351 149 170 254	1:4,635: 0,835	1,488 1,516	1,29 1,355
N II	HOZ 275 W	250 256	Normens.I Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-25	134 363 147 169 240	1:4,212: 0,78	1,498 1,534	1,22 —
N III 35	PZ 375 A	651 653	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15	163 360 188 185	1:1,376: 0,48*)	1,860 1,865	1,03 1,04
N III 36	PZ 375 A	521 521	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15	130 432 225 221	1:1,936: 0,545*)	1,811 1,810	1,16 1,21
N III 37	PZ 375 A	390 380	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15	98 503 262 258	1:2,87: 0,655*)	1,766 1,718	1,39 1,42
N III 45	PZ 375 A	651 659	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15/25	163 257 139 149 142	1:1,30: 0,48*)	1,813 1,831	1,00 1,01

*) Gesamtwasser einschließlich des infolge 7 tägiger Wasserlagerung von den Zuschlägen aufgesaugten Kernwassers.

Tabelle 32: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Zement Z	Z-Geh. ange- strebt vorh. [kg/m ³]	Zuschlag S	Korn- gruppe [mm]	S - Gehalt [kg/m ³]	Mischungs- verhältnis z : s : w	γ_r $\gamma_{vorh.}$ [g/cm ³]	v_0 v_{30}
N III 46	PZ 375 A	521 517	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-25	130 307 167 178 170	1:1,826: 0,548 ^{*)}	1,757 1,743	1,07 1,10
N III 47	PZ 375 A	390 384	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-25	98 359 195 208 198	1:2,70: 0,655 ^{*)}	1,702 1,672	1,23 1,29
N IV	HOZ 275 T	260 271	Quarzsand Norlit	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-25	126 363 147 169 240	1:4,02: 0,75	1,500 1,564	1,228 1,280
N V	PZ 275 A	300 -	Natursand Norlit	0-3 3-7 7-15 15-25	645 155 176 264	1:4,13: 0,55	1,704 -	- -
N VI	PZ 275 A	230 248	Normens.I Norlit Naturkies	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-30	142 351 149 170 593	1:6,10: 0,835	1,827 1,970	1,09 1,19

Tabelle 32: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Zement Z	Z-Geh. ange- strebt vorh. [kg/m ³]	Zuschlag S	Korn- gruppe [mm]	S - Gehalt [kg/m ³]	Mischungs- verhältnis z : s : w	γ_r $\gamma_{\text{vorh.}}$ [g/cm ³]	v_0 v_{30}
L I	PZ 275 A	340 329	Quarzsand Leca	0-0,2 0-3 3-7 7-15	148 331 175 179	1:2,45: 0,56	1,363 1,320	1,456 1,538
L II	PZ 275 H	300	Quarzsand Leca	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-20	94 289 179 143 70	1:2,58: 0,65	1,270 1,252	1,38 1,40
L III	HOZ 275 T	280	Quarzsand Leca	0-0,2 0-3 3-7 7-15 15-20	112 281 139 138 97	1:2,74: 0,75	1,260 1,224	1,316 1,370
D I	PZ 375 A	365	Quarzsand detoon	0-0,2 0-2 2-5 5-12	50 306 214 302	1:2,390: 0,547	1,436 -	- -
D II	PZ 375 A	365	Quarzsand Natursand detoon	0-0,2 0-3 0-2 2-5 5-12	50 330 121 214 302	1:2,79: 0,547	1,594 -	- -

Tabelle 33: Festbetoneigenschaften der untersuchten Leichtbetone

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Betonrohddichte γ [g/cm ³]	Würfeldruckfestigk. β_w [kp/cm ²]		E-Modul (Mittel) [kp/cm ²]	Zugehöriger Mörtel	
			Einzelw.	Mittel		Bezeichnung	β_w (Mittel) [kp/cm ²]
N I	3	1,510	181	183		Nm I	225
	3	1,510	185				
	3	1,510	184				
	7	1,500	220	-			322
	28	1,475	295	286	162000		403
	28	1,497	275				
	28	1,470	290				
N II	7	1,520	172	169		Nm II	249
	7	1,510	172				
	7	1,520	162				
	28	1,510	255	257			390
	28	1,510	257				
	28	1,510	260				
N III 35	3	1,828	396	385		Nm III	433
	3	1,833	406				
	3	1,811	354				
	7	1,789	431	436			407 ^{*)} (445)
	7	1,794	391				
	7	1,864	485				
	28	1,808	489	502	216000		547
	28	1,804	541				
	28	1,788	477				
N III 36	3	1,783	373	357		Nm III	433
	3	1,764	379				
	3	1,781	319				
	7	1,782	469	455			407 ^{*)} (445)
	7	1,772	464				
	7	1,772	432				
	28	1,764	454	431	217000		547
	28	1,750	404				
	28	1,752	435				

*) Interpolierter Wert

Tabelle 33: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Beton- rohdichte γ [g/cm ³]	Würfeldruckfestigk. β_w [kp/cm ²]		E-Modul (Mittel) [kp/cm ²]	Zugehöriger Mörtel	
			Einzelw.	Mittel		Bezeichnung	β_w (Mittel) [kp/cm ²]
N III 37	3	1,675	366	336		Nm III	433
	3	1,707	311				
	3	1,671	331				
	7	1,669	385	400			407 (445)*)
	7	1,687	419				
	7	1,687	396				
	28	1,660	424	448	197000		547
	28	1,653	461				
	28	1,650	459				
N III 45	3	1,744	312	327		Nm III	433
	3	1,746	338				
	3	1,746	336				
	7	1,754	381	335			407 (445)*)
	7	1,746	339				
	7	1,745	285				
	28	1,752	405	416	198000		547
	28	1,744	453				
	28	1,737	389				
N III 46	3	1,709	382	374		Nm III	433
	3	1,698	332				
	3	1,704	409				
	7	1,713	450	409			407 (445)*)
	7	1,703	385				
	7	1,709	391				
	28	1,668	398	403	212000		547
	28	1,699	382				
	28	1,701	429				
N III 47	3	1,650	321	308		Nm III	433
	3	1,647	281				
	3	1,658	323				
	7	1,644	289	337			407 (445)*)
	7	1,649	347				
	7	1,646	377				
	28	1,591	399	412	198000		547
	28	1,638	413				
	28	1,484	425				

*) Interpolierter Wert

Tabelle 33: (Fortsetzung)

Bezeichnung	Prüfalter (Tage)	Beton- rohdichte γ [g/cm ³]	Würfeldruckfestigk. β_w [kp/cm ²]		E-Modul (Mittel) [kp/cm ²]	Zugehöriger Mörtel	
			Einzelw.	Mittel		Bezeichnung	β_w (Mittel) [kp/cm ²]
N IV	15	1,440	195	195		Nm IV	233
	15	1,520	200				
	15	1,510	190				
	28	1,510	252	240			303
	28	1,500	217				
	28	1,500	250				
	28	1,490	245				
	28	1,500	242				
N V	3	1,700	242	266		Nm V	333
	3	1,700	290				
	7	1,710	292	270			376
	7	1,740	247				
	28	-	337	323			444
	28	-	315				
	28	-	317				
N VI	7	1,960	225	222		Nm VI	261
	7	1,960	237				
	7	1,940	205				
	14	1,910	255	248			268
	14	1,880	245				
	14	1,900	245				
	28	1,870	257	266			287
	28	1,880	267				
	28	1,880	275				
L I	7	1,300	210	210		Lm I	320
	7	1,300	207				
	7	1,290	212				
	28	1,280	212	220			327
	28	1,280	227		118000		
	28	1,280	222				

Tabelle 33: (Fortsetzung)

Bezeich- nung	Prüf- alter (Tage)	Beton- rohdichte γ [g/cm ³]	Würfeldruckfestigk. β_w [kp/cm ²]		E-Modul (Mittel) [kp/cm ²]	Zugehöriger Mörtel	
			Einzelw.	Mittel		Bezeich- nung	β_w (Mittel) [kp/cm ²]
L II	14	1,220	212	208		Lm II	404
	14	1,220	190				
	14	1,220	222				
	28	1,210	218	235	98000		404
	28	1,220	230				
	28	1,210	257				
L III	14	1,150	135	137		Lm III	180
	14	1,170	147				
	14	1,180	130				
	28	1,160	187	164			221
	28	1,150	145				
	28	1,150	175				
	28	1,150	167				
	28	1,140	162				
	28	1,140	147				
D I	28	-	450	-			
D II	28	-	530	-			

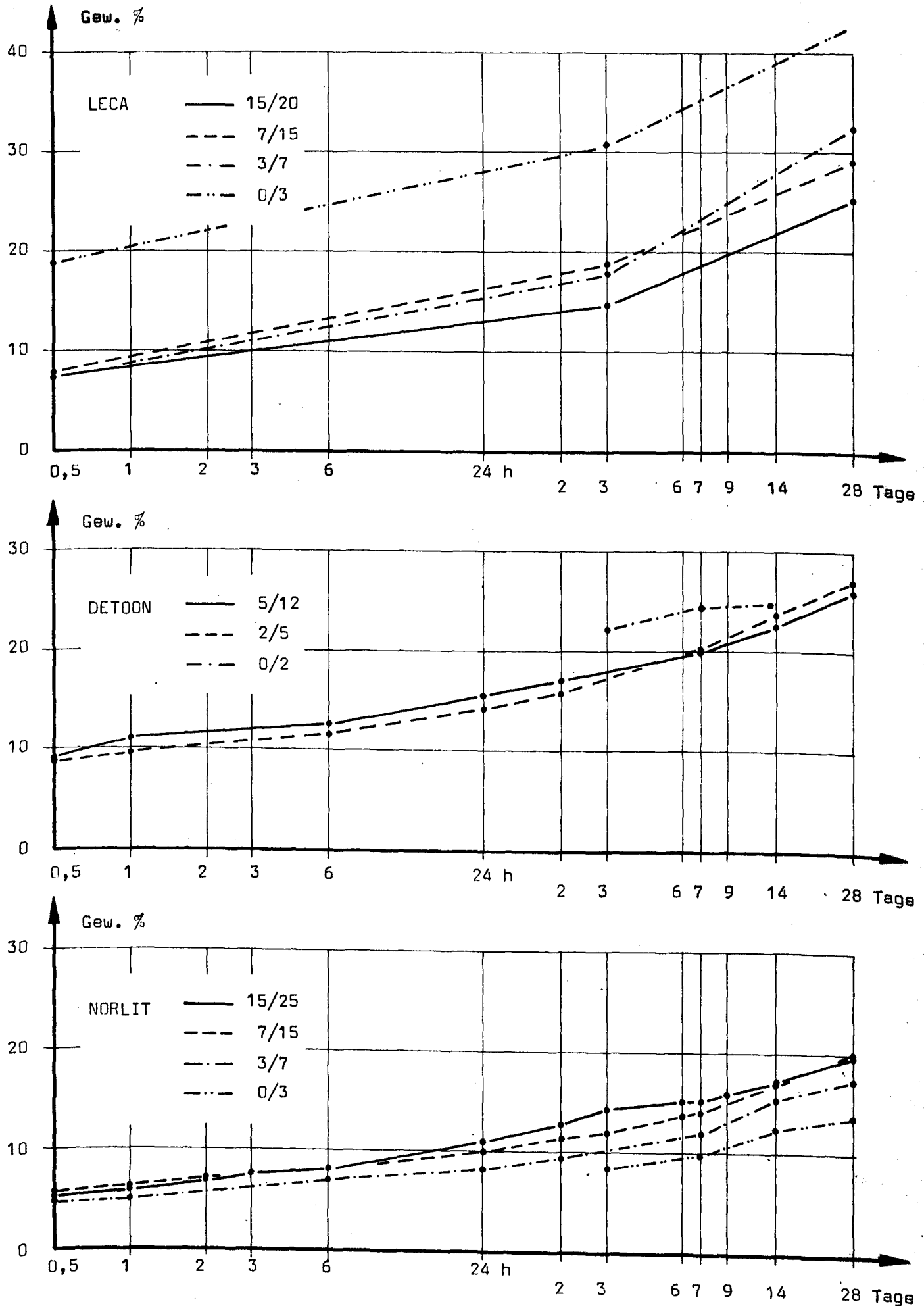


Abb. 1 Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Wasserlagerung

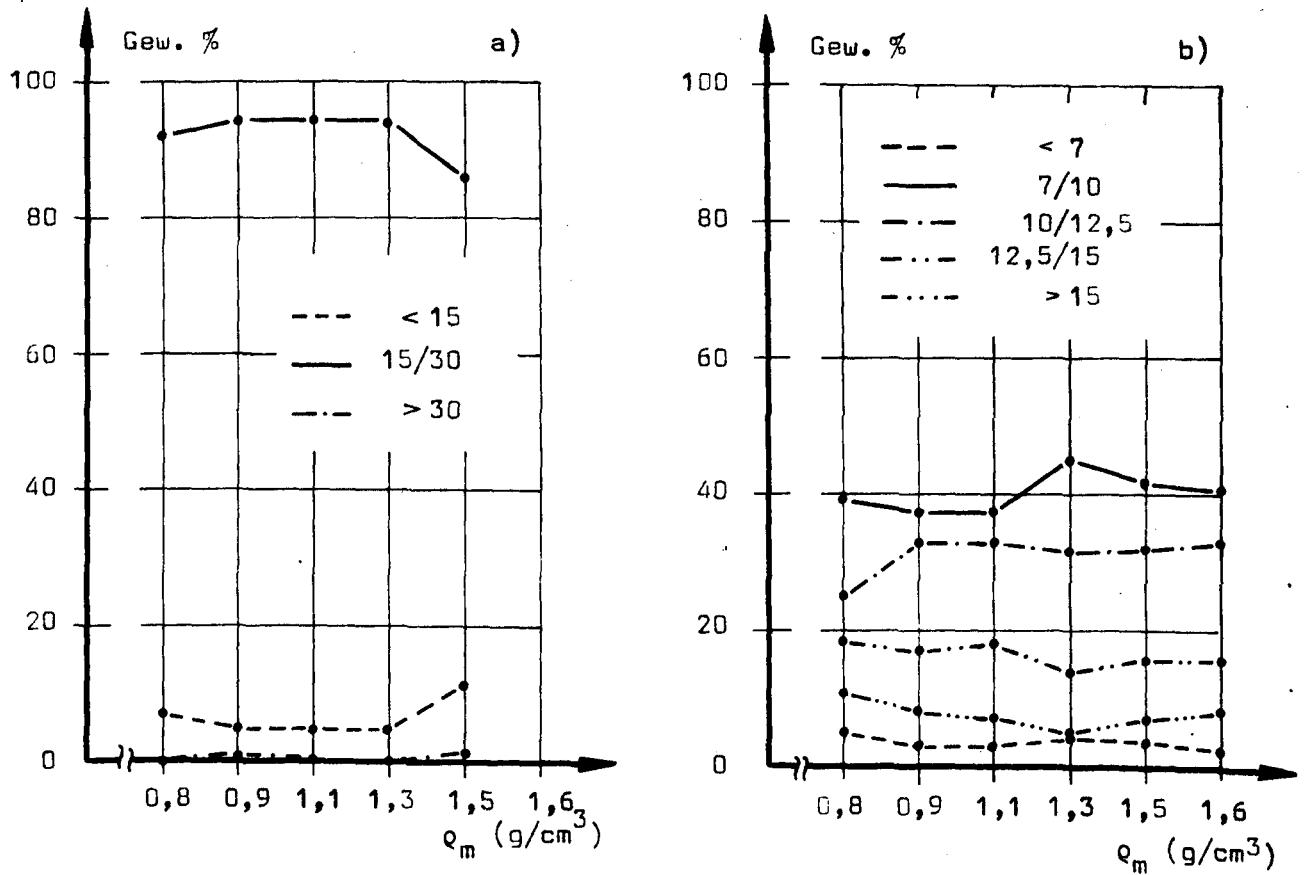


Abb. 2 Kornzusammensetzung in Abhängigkeit von der mittleren Kornrohdichte Q_m für a) Norlit 15/25, b) Norlit 7/15

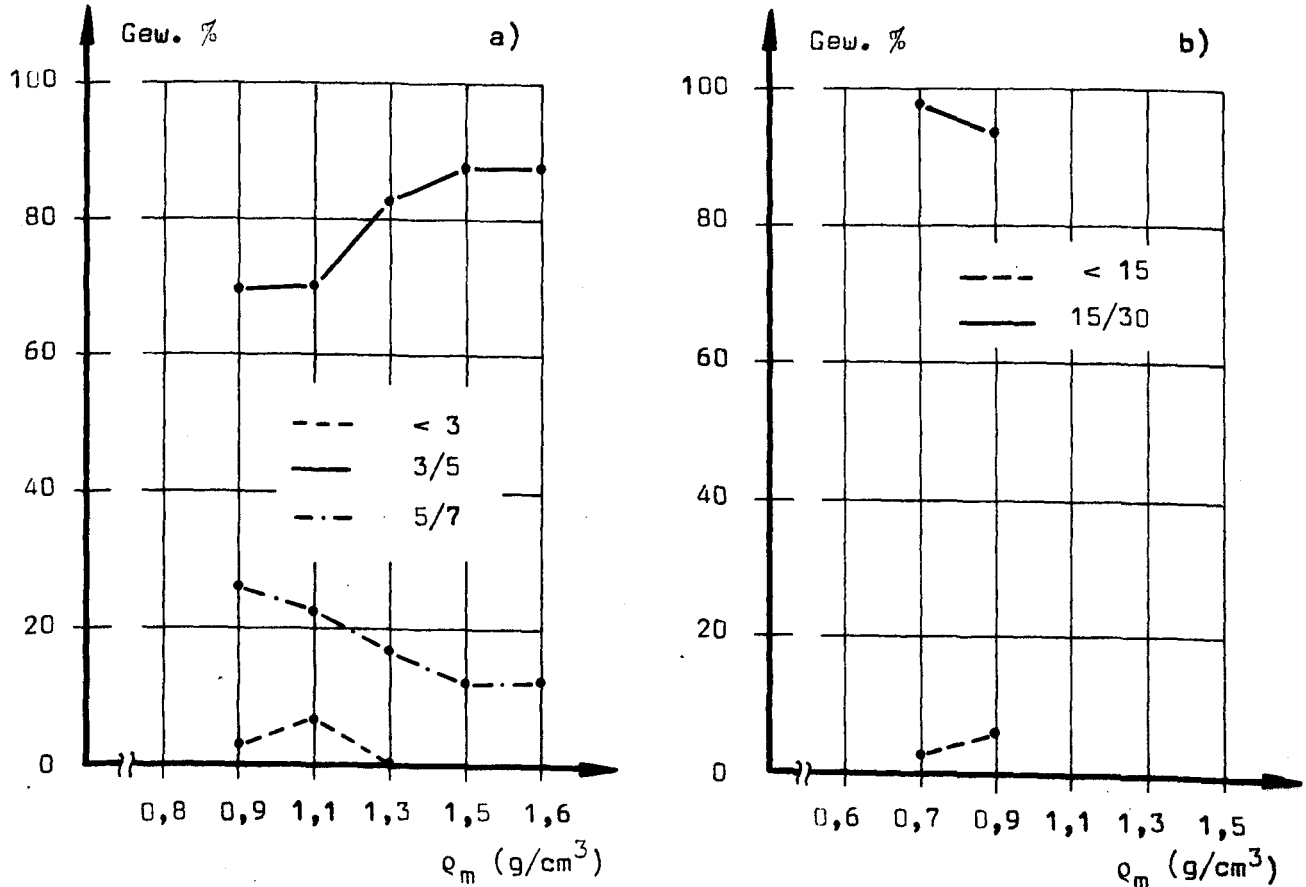


Abb. 3 Kornzusammensetzung in Abhängigkeit von der mittleren Kornrohdichte Q_m für a) Norlit 3/7, b) Leca 15/20

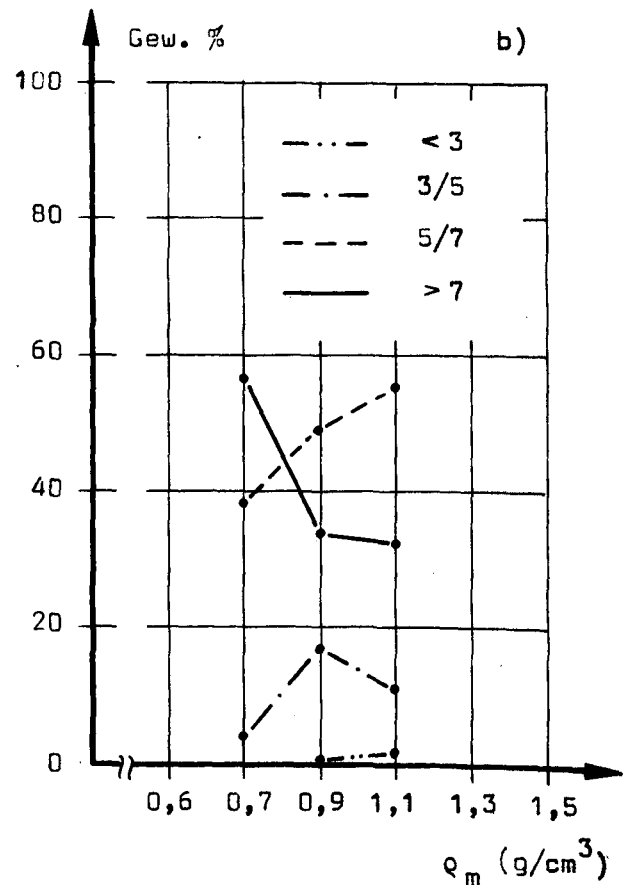
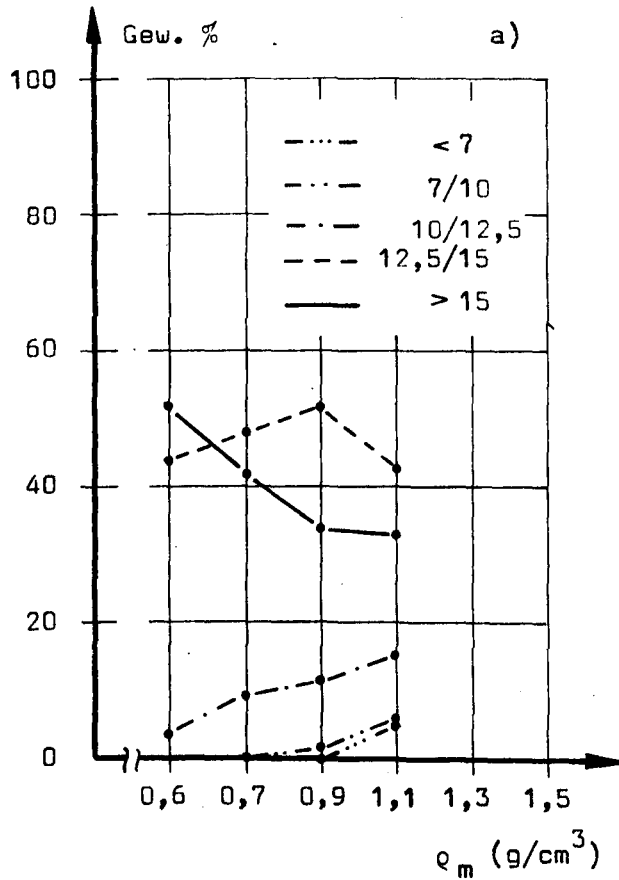


Abb. 4 Kornzusammensetzung in Abhängigkeit von der mittleren Kornrohdichte q_m für a) Leca 7/15, b) Leca 3/7

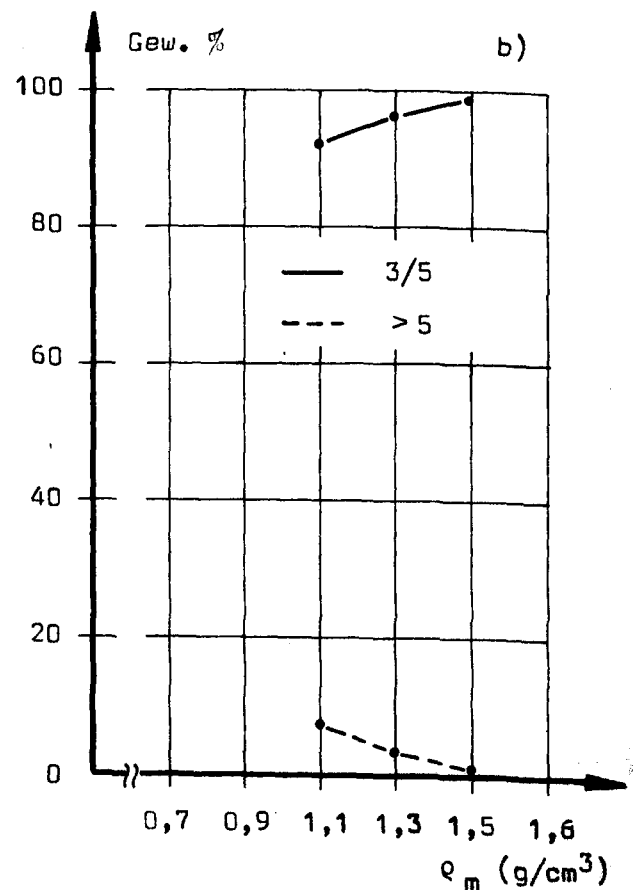
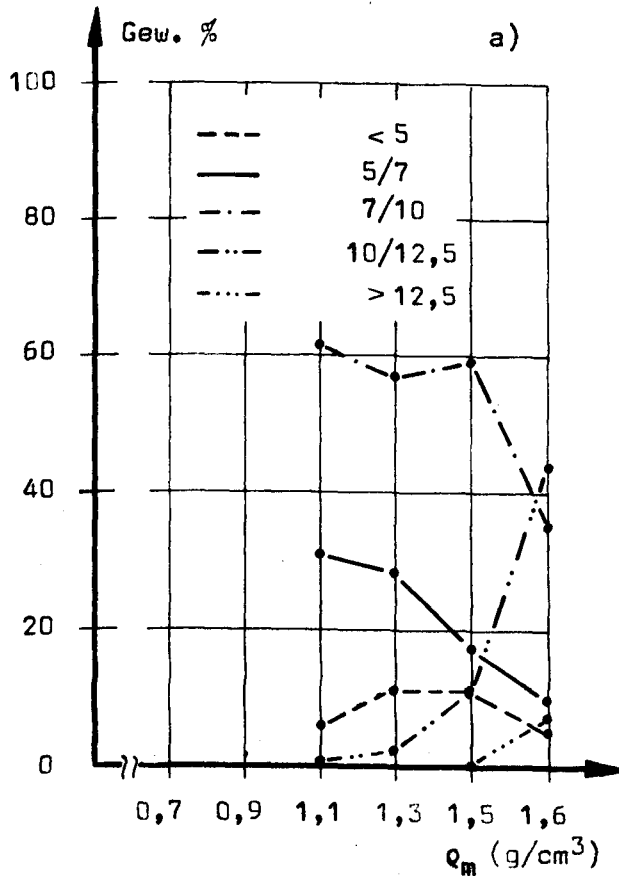


Abb. 5 Kornzusammensetzung in Abhängigkeit von der mittleren Kornrohdichte q_m für a) detoon 5/12, b) detoon 2/5

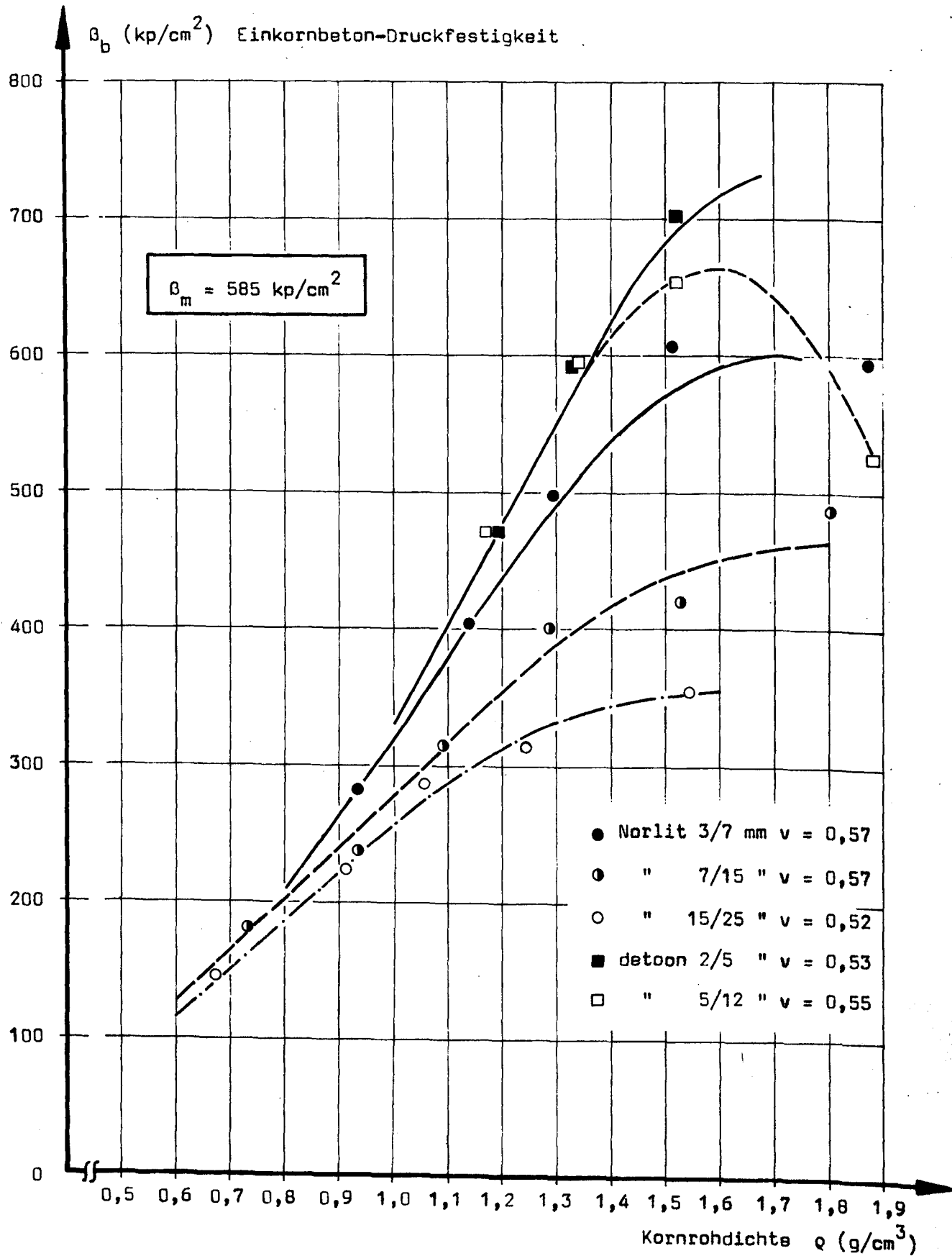


Abb. 6 Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 50/70 \text{ mm}$) von Blähschiefer Norlit und Blähton detoon für konstante Mörteldruckfestigkeit β_m (Mörtel M1)

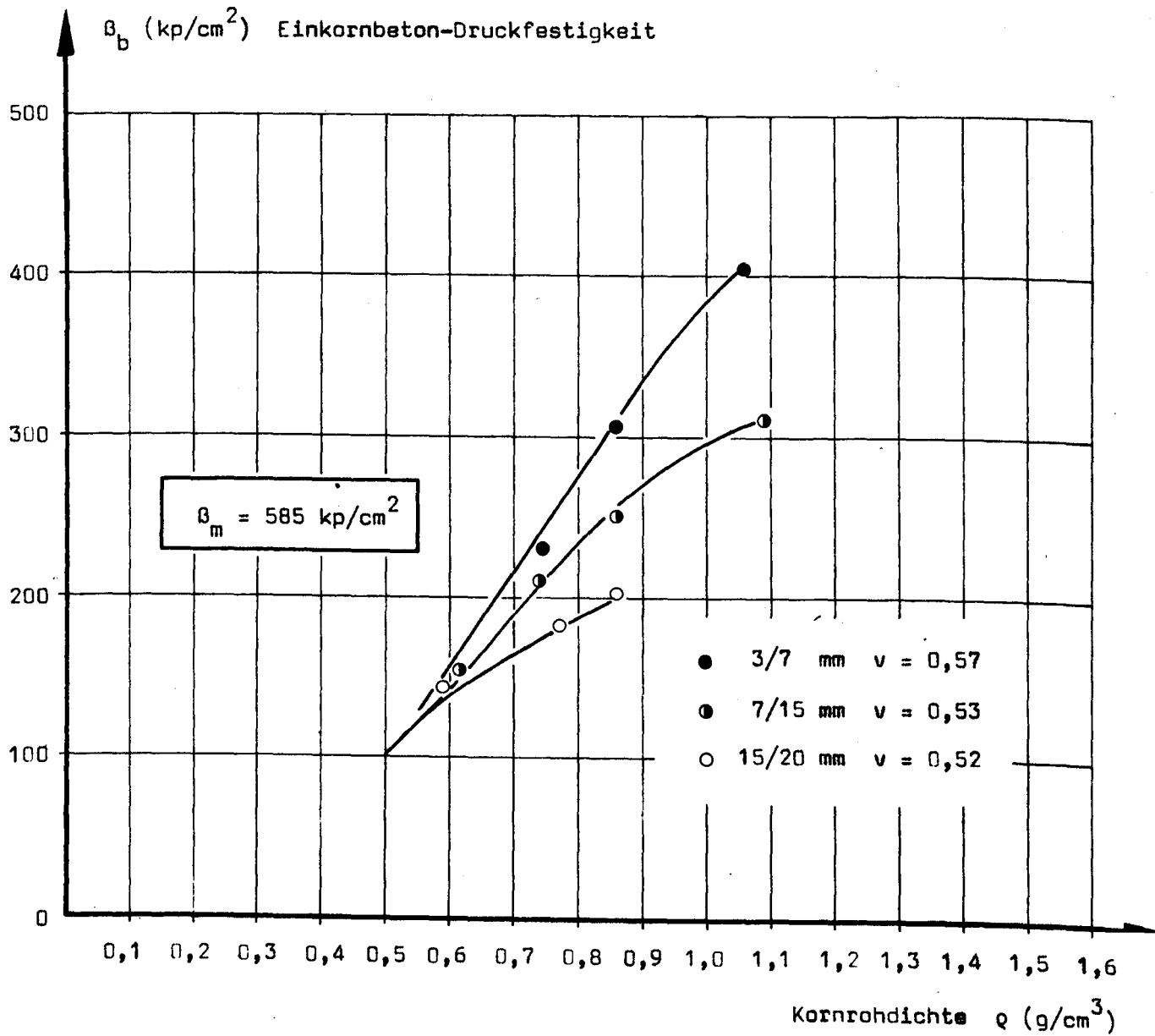


Abb. 7 Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 50/70 \text{ mm}$) von Blähton Leca für konstante Mörteldruckfestigkeit β_m (Mörtel M1)

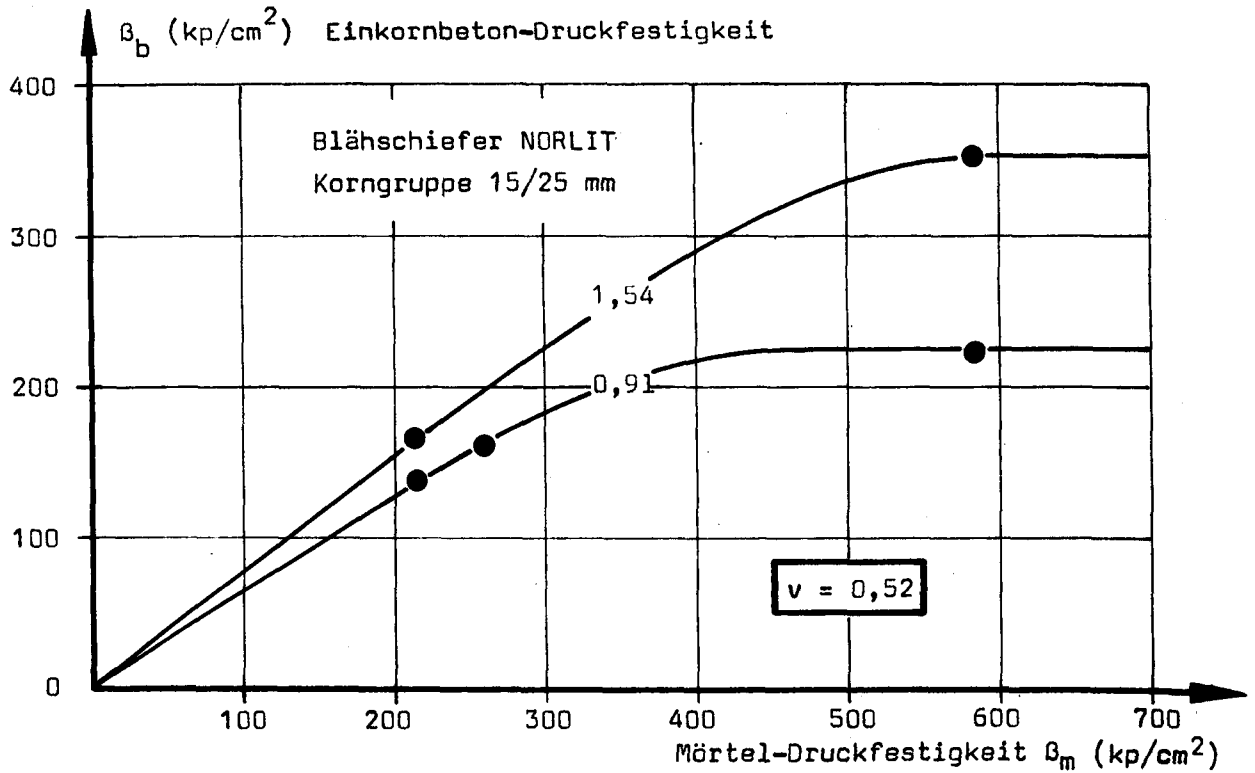


Abb. 8 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohddichte

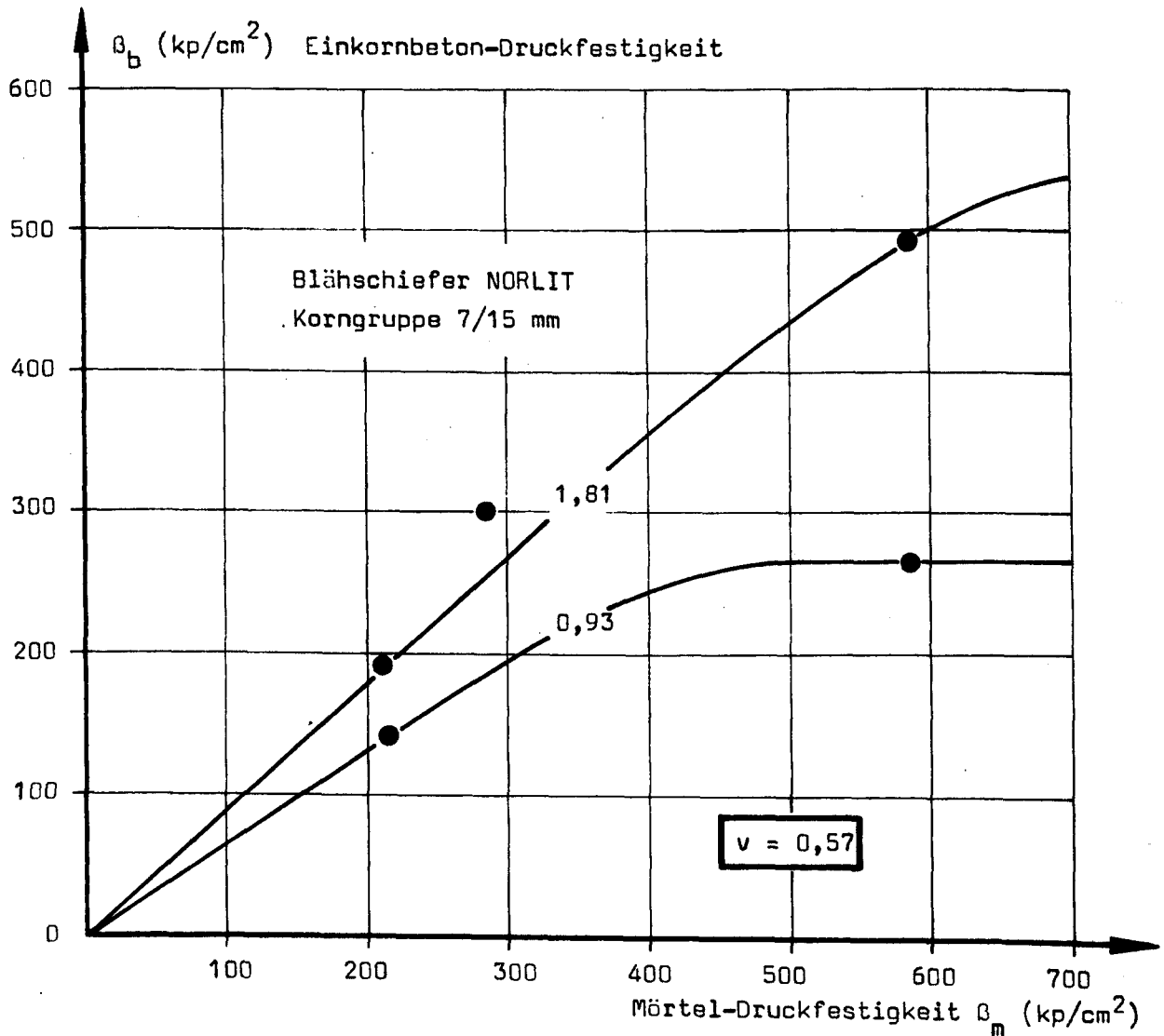


Abb. 9 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohddichte

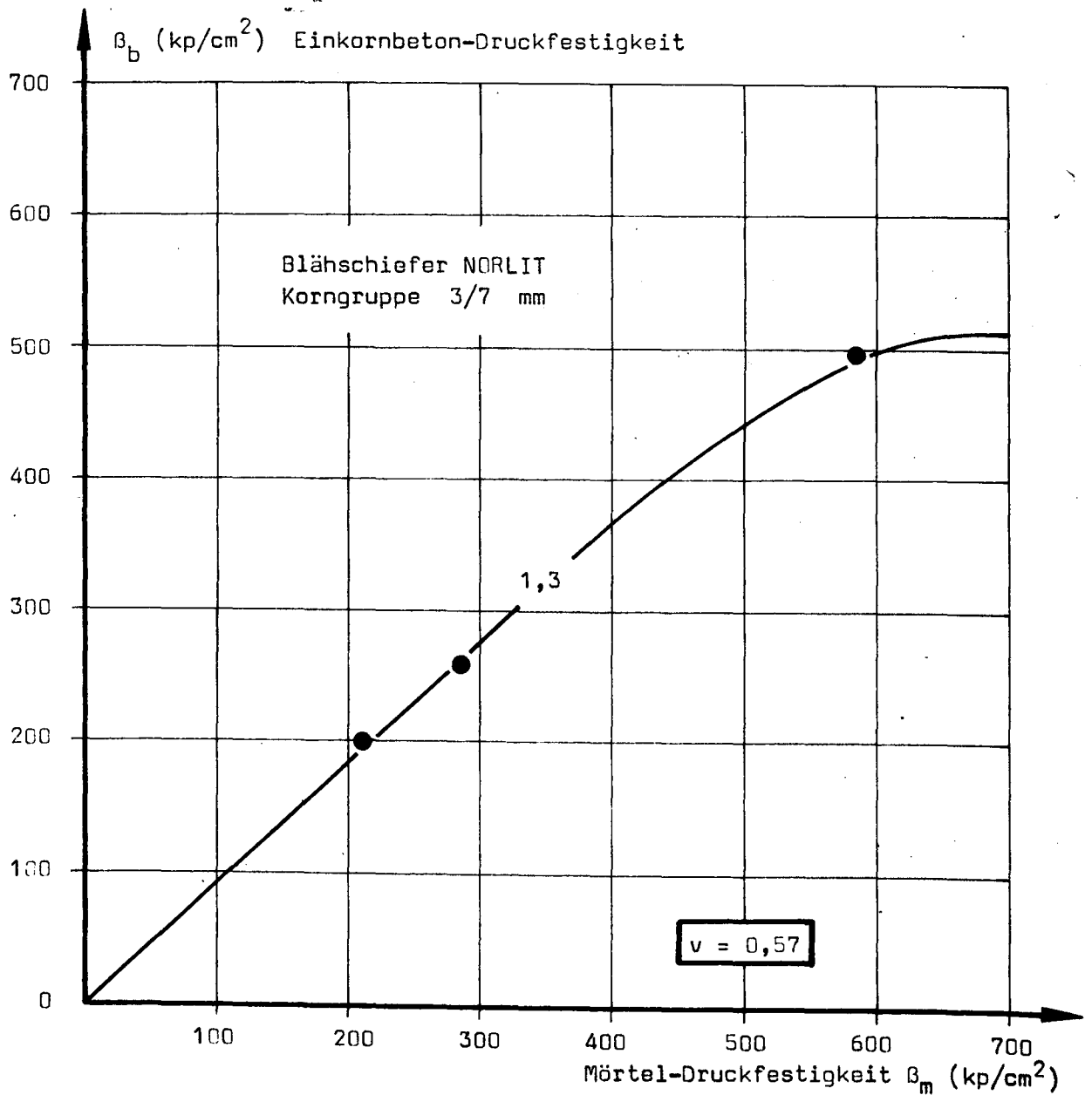


Abb.10 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohdichte

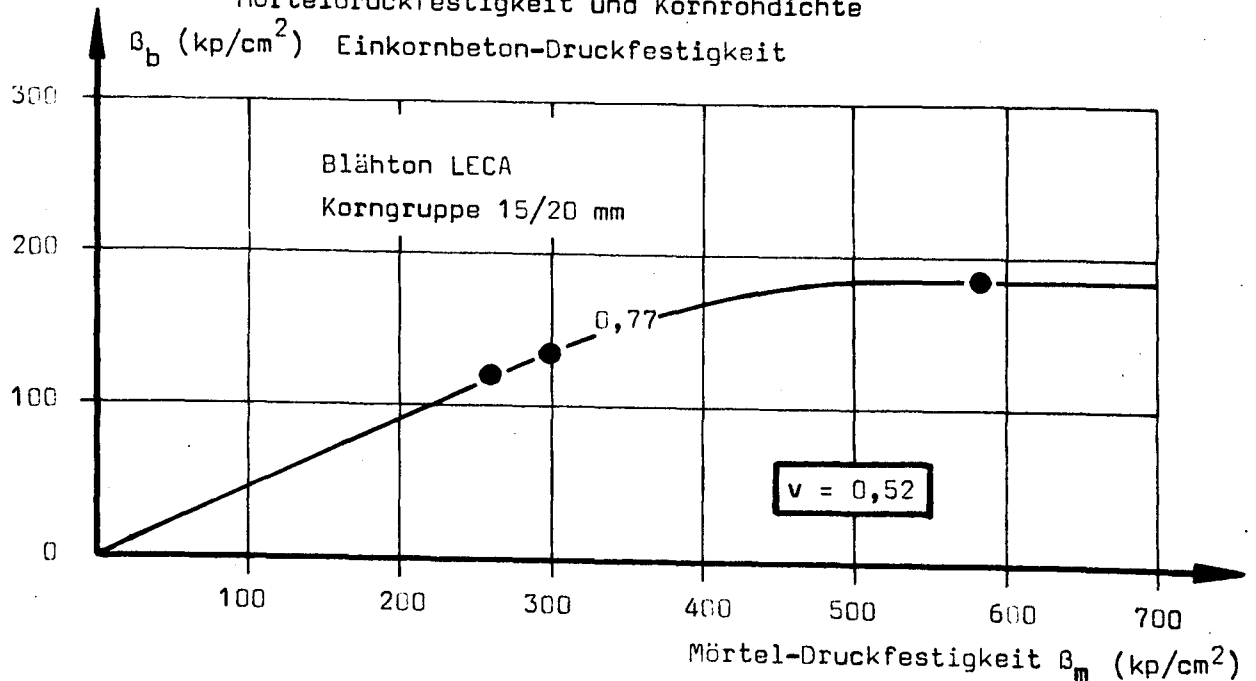


Abb. 11 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohdichte

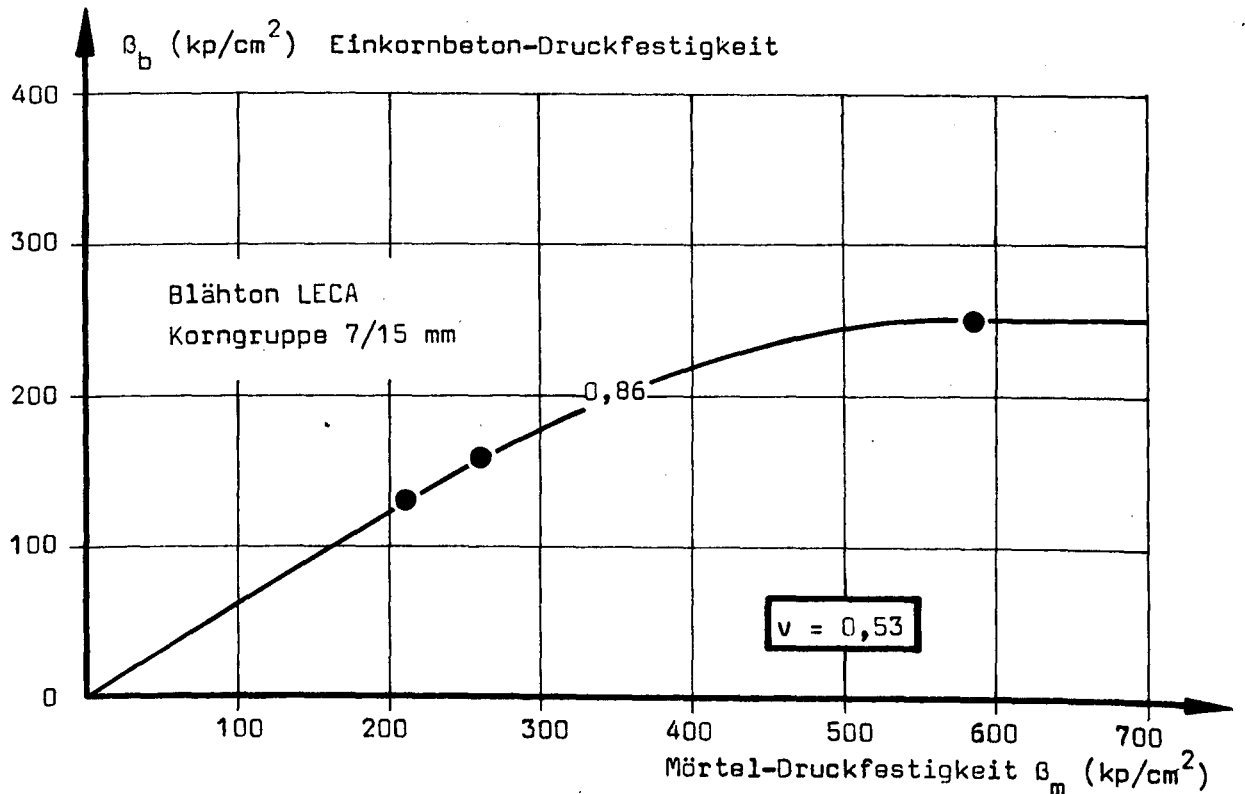


Abb. 12 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohddichte

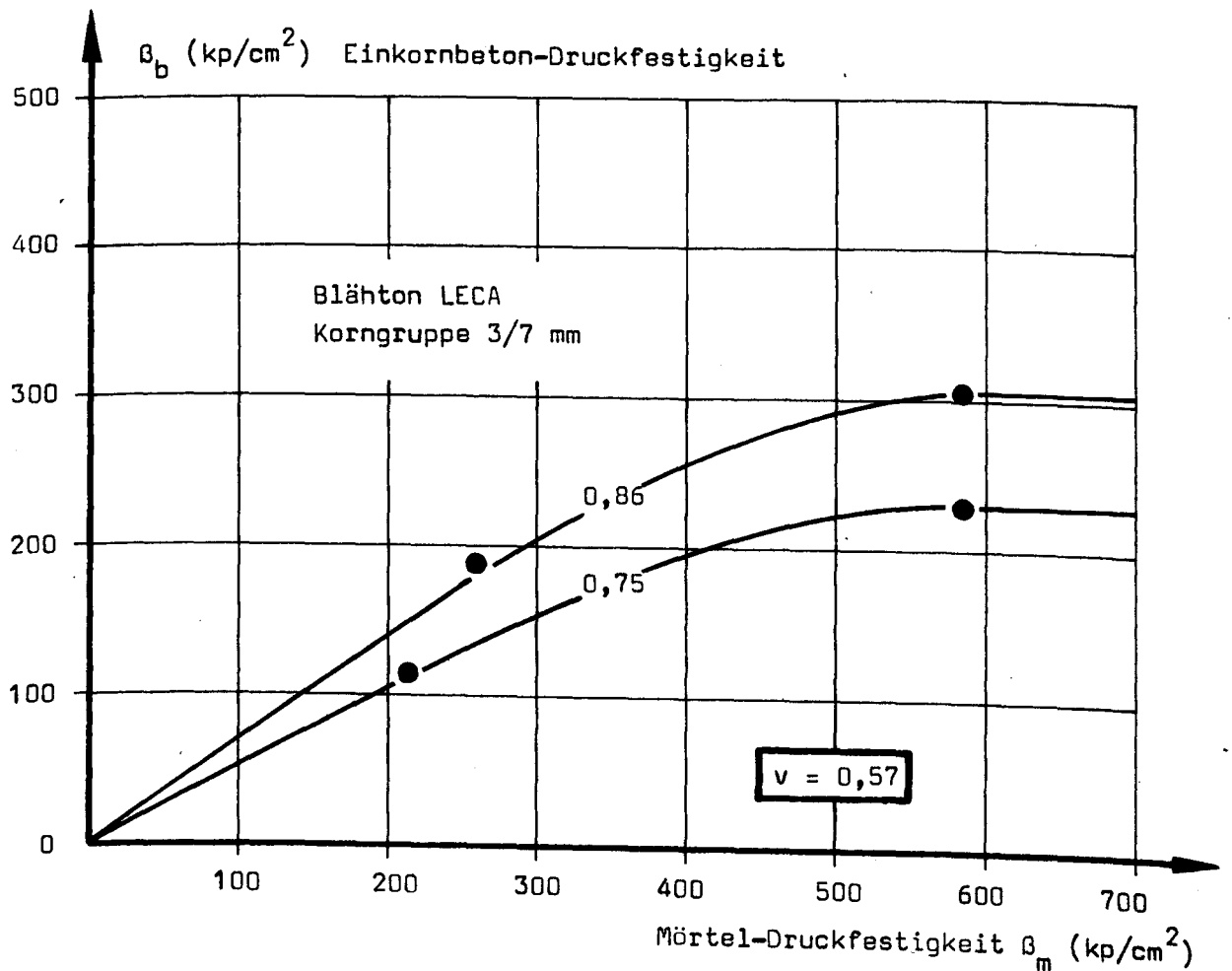


Abb. 13 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit und Kornrohddichte

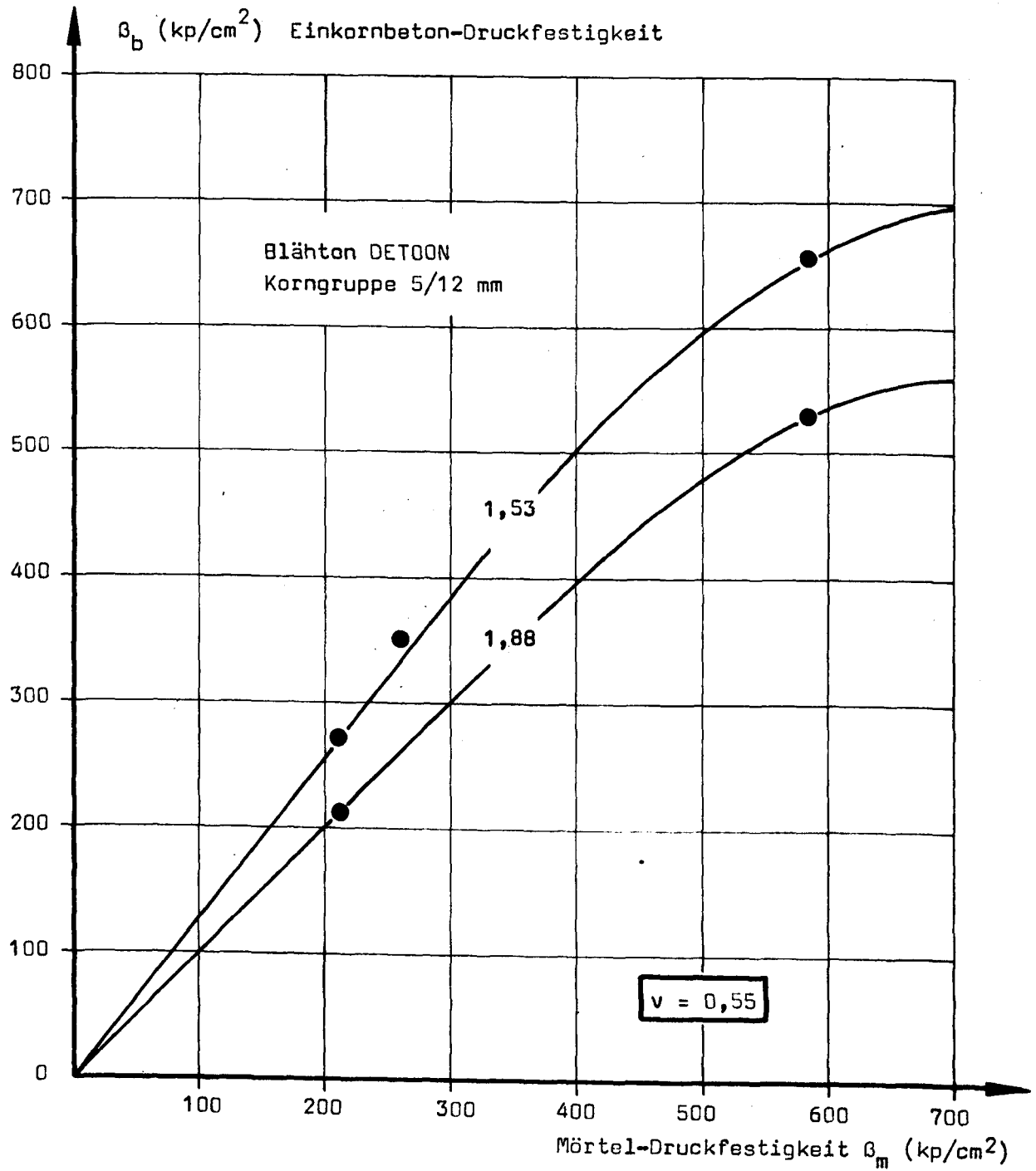


Abb. 14 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörtel-Druckfestigkeit und Kornrohddichte

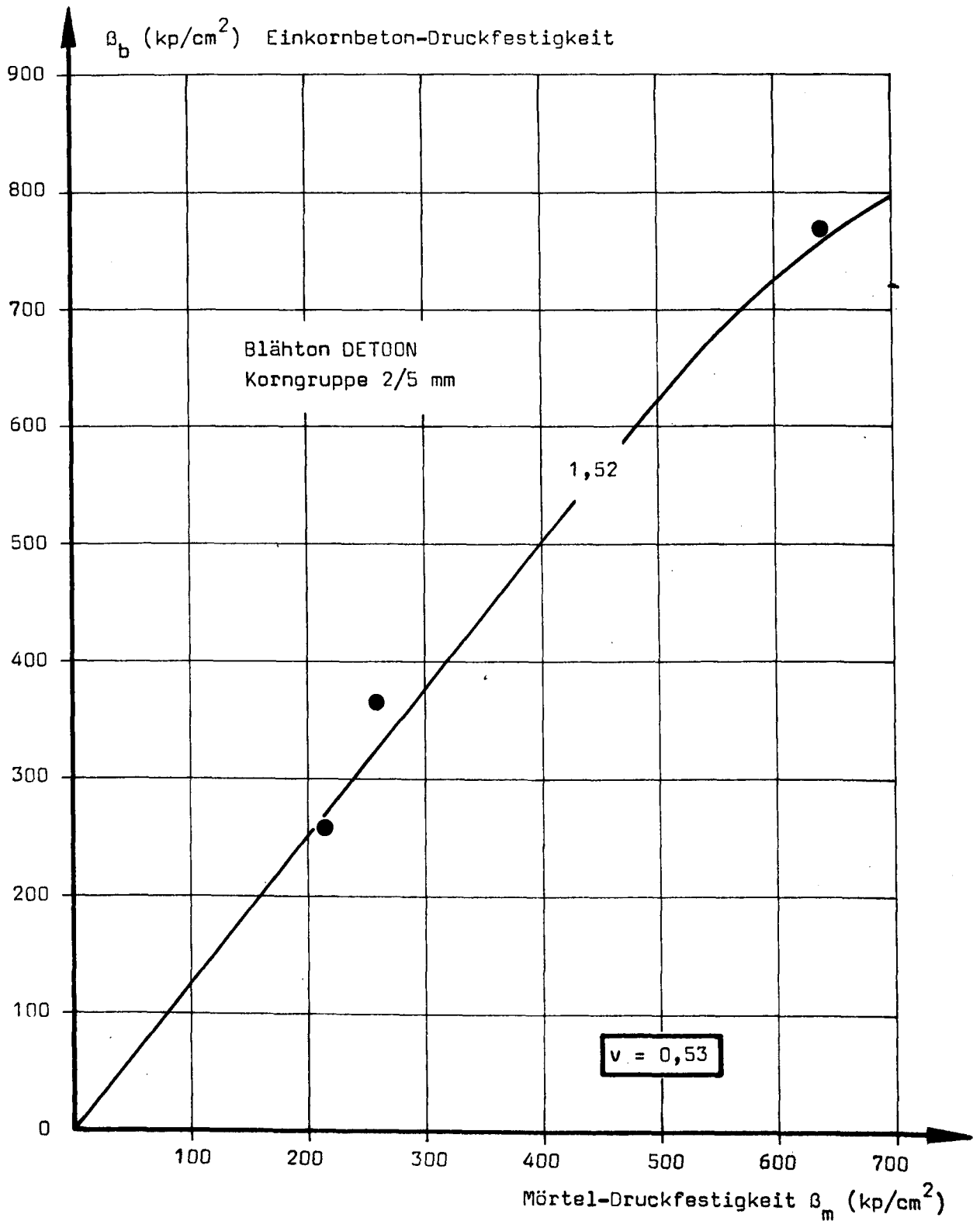


Abb. 15 Einkornbeton-Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Mörtel-Druckfestigkeit und Kornrohddichte

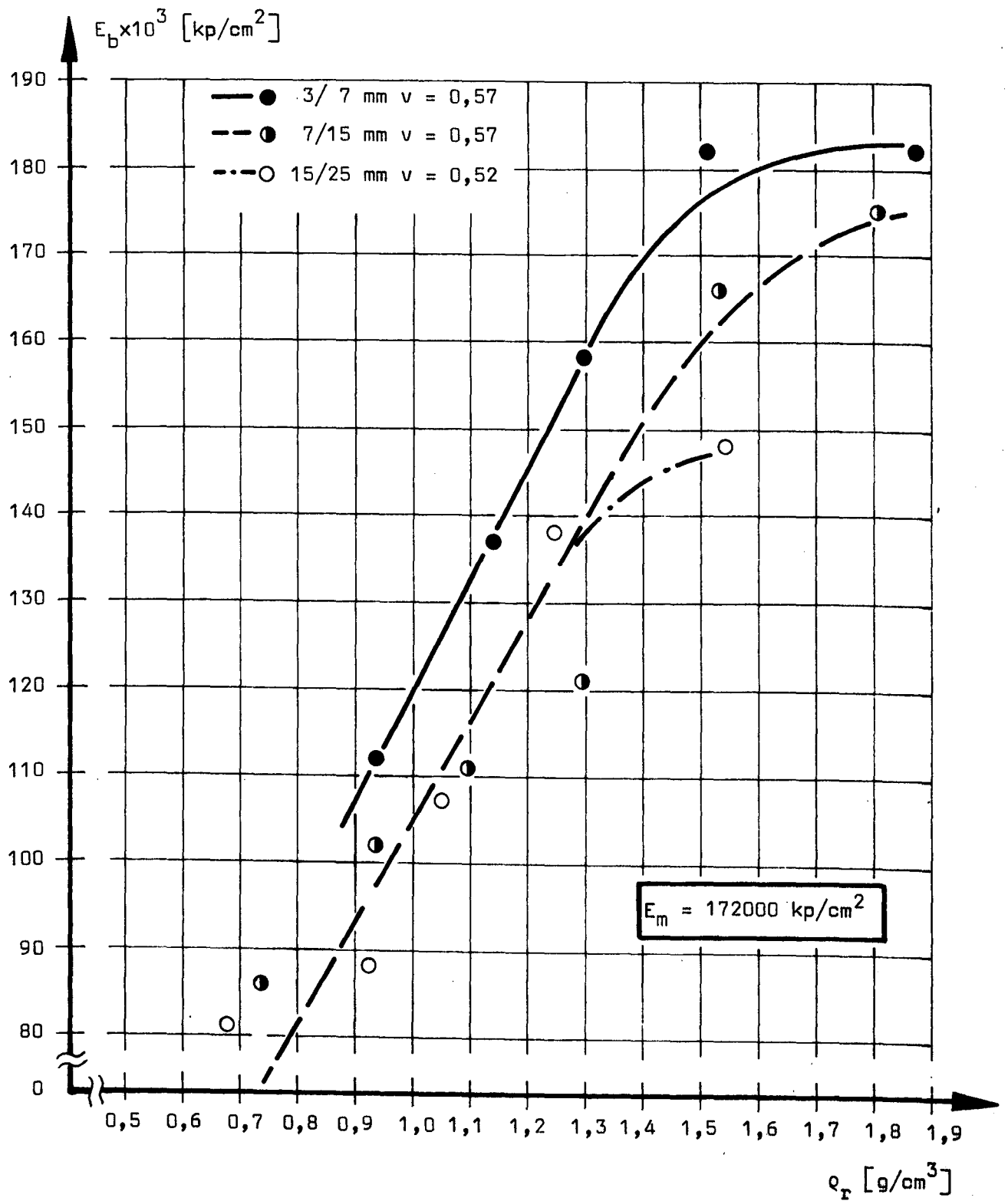


Abb. 16 E-Modul des Einkornbetons in Abhängigkeit von der Kornroh-
dichte für Norlit

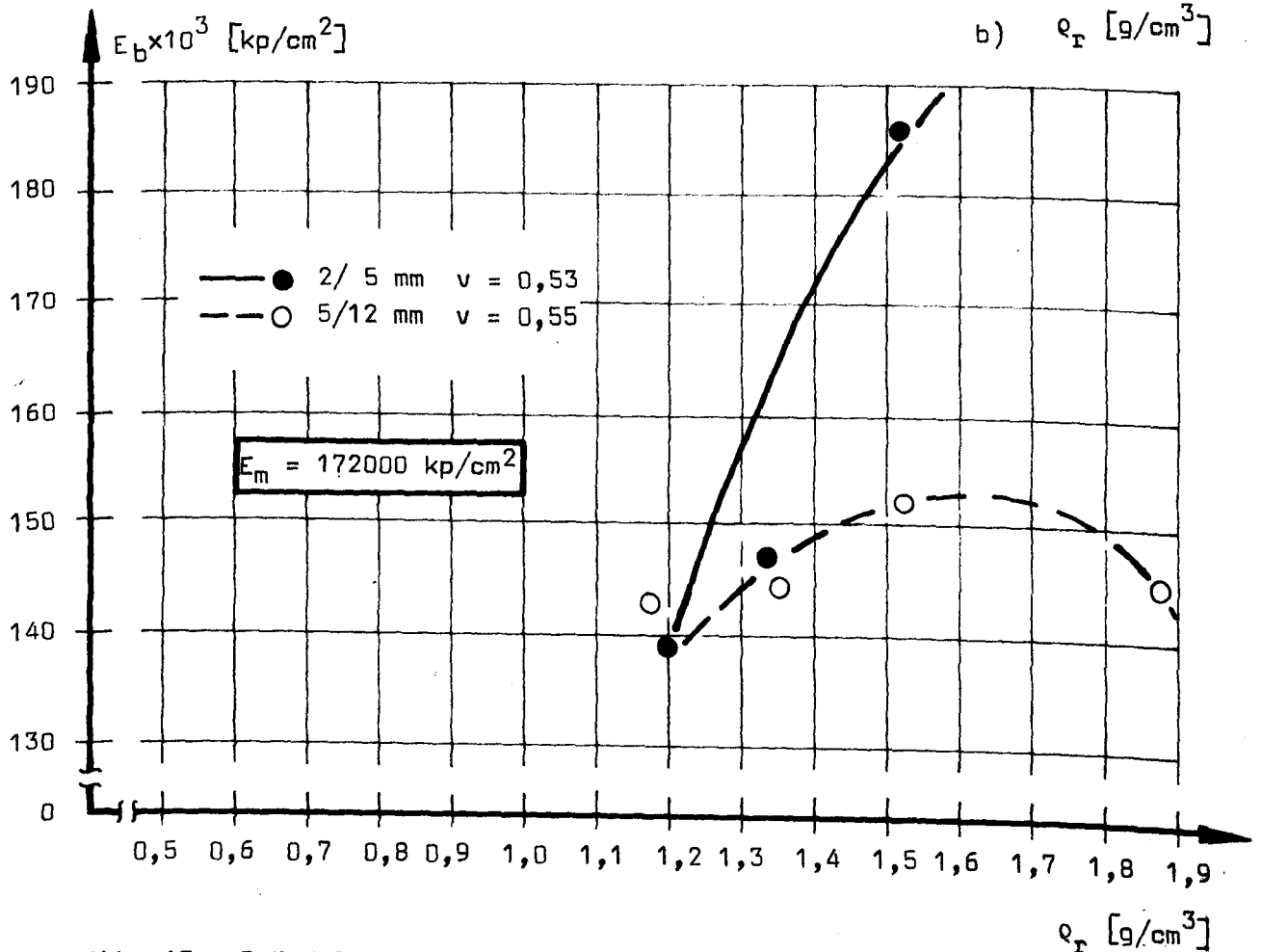
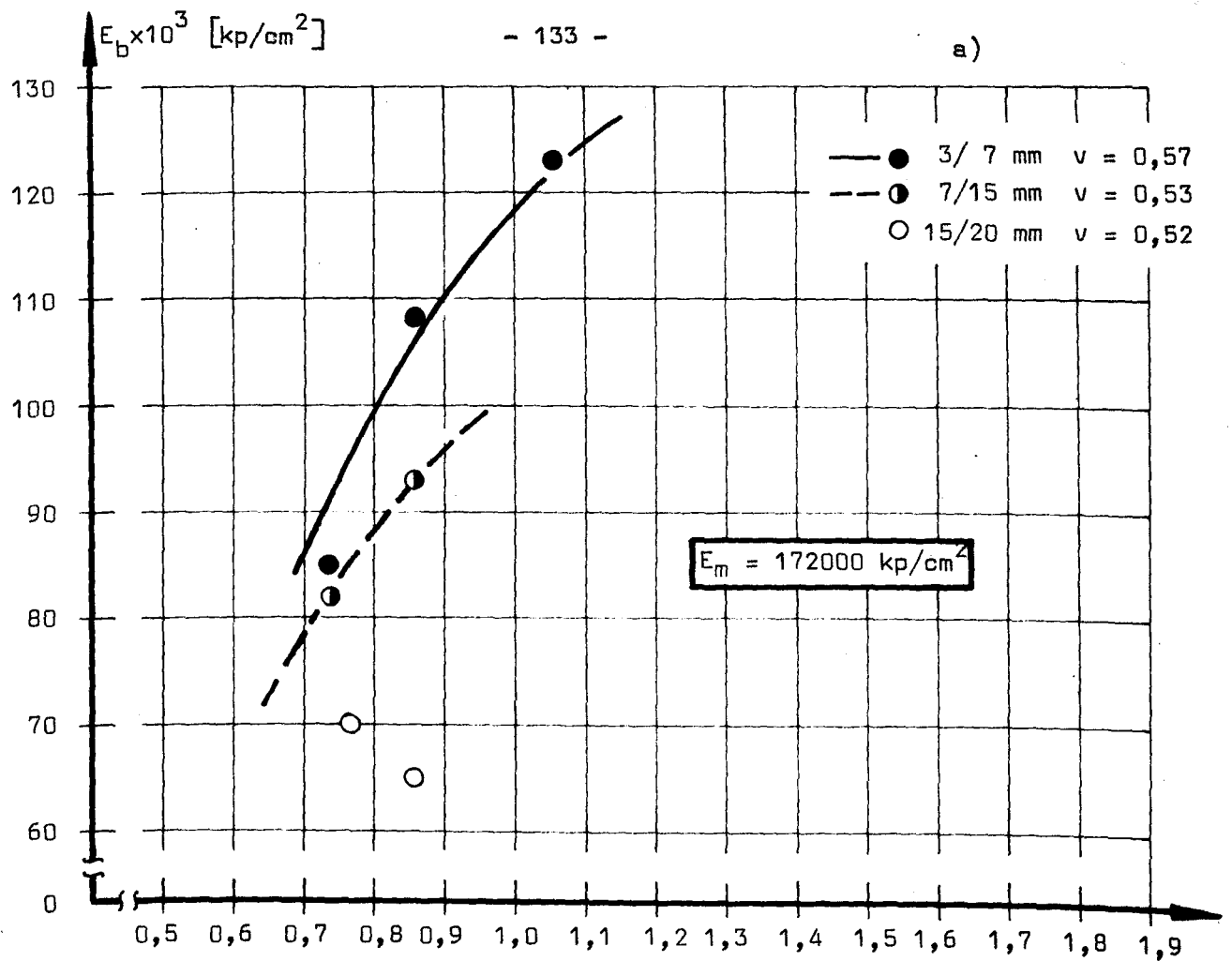


Abb. 17 E-Modul des Einkornbetons in Abhängigkeit von der Kornrohdichte für a) Leca, b) Detoon

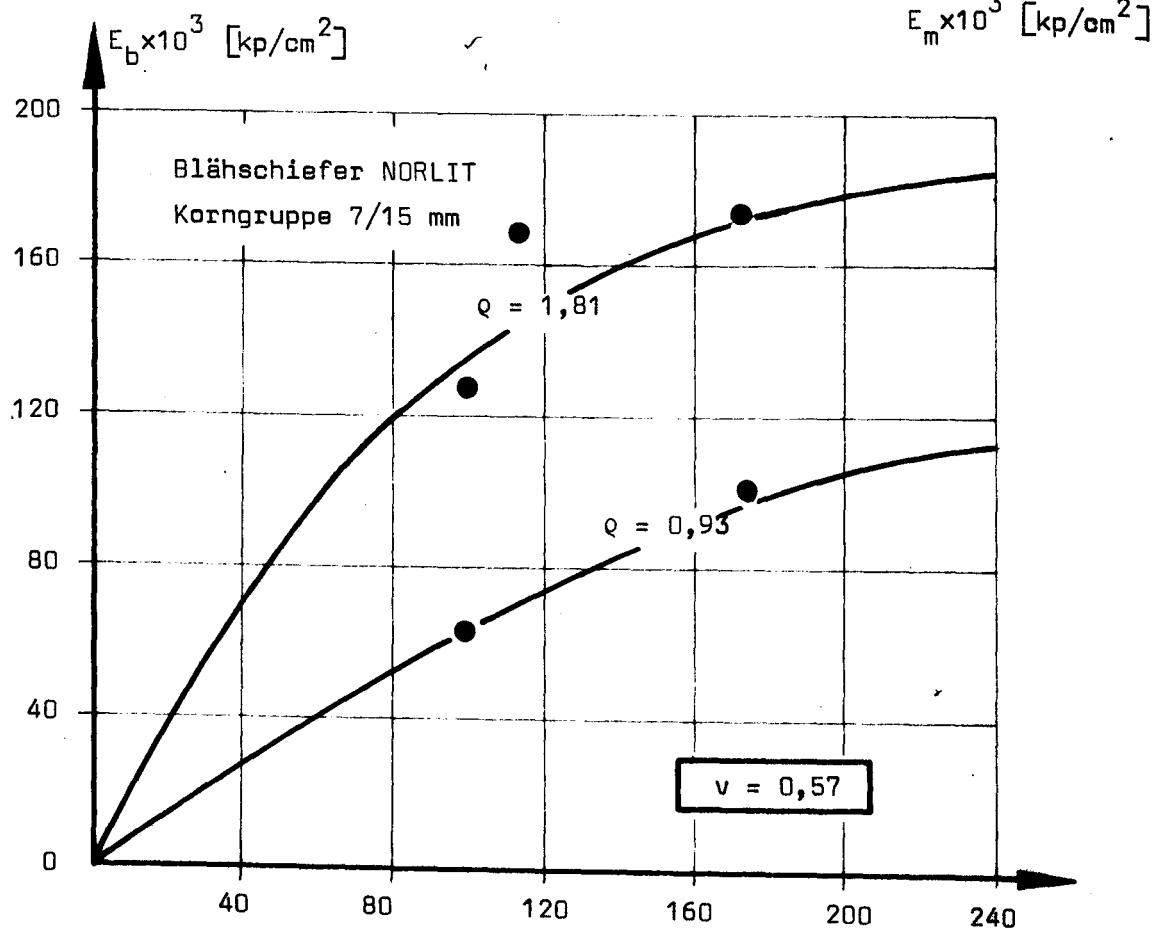
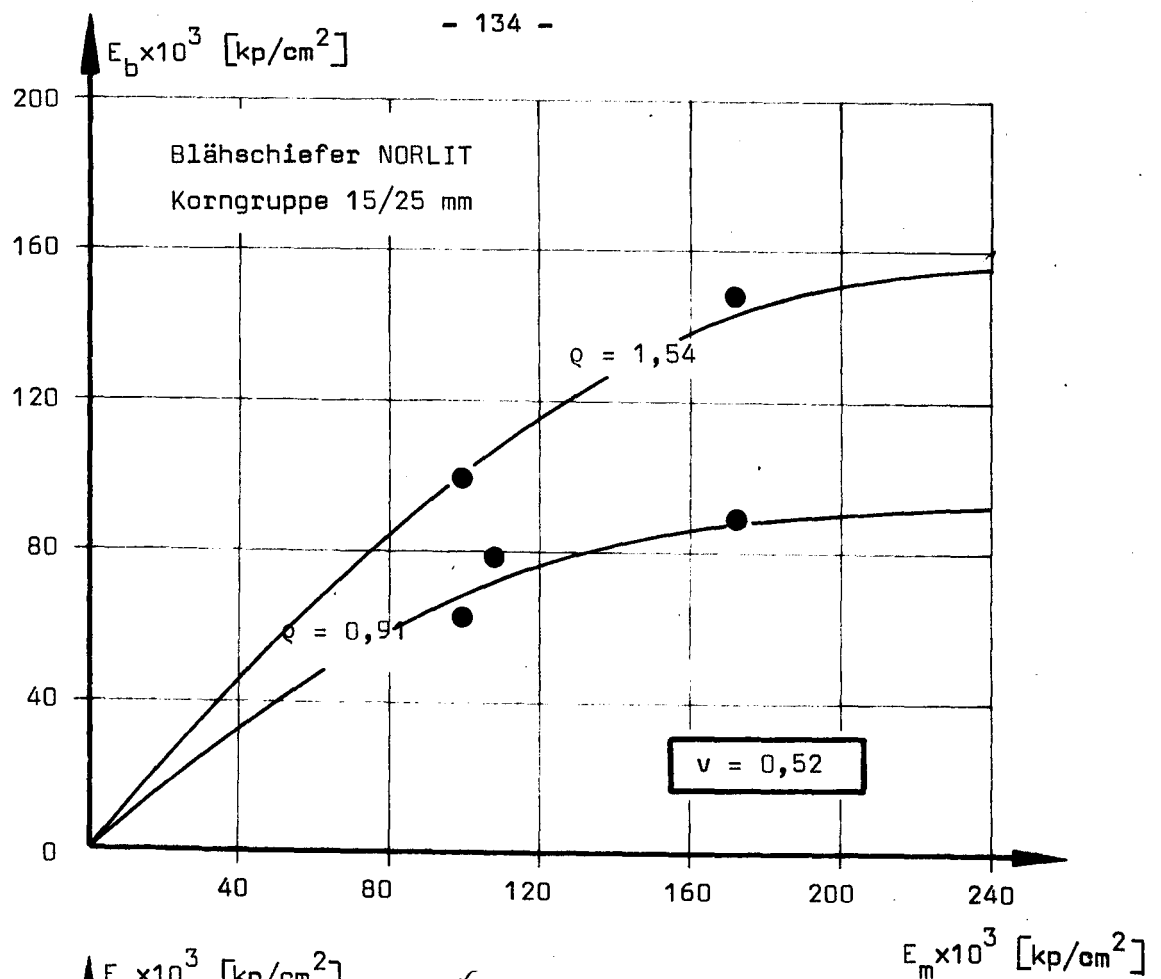


Abb. 18 Einkornbeton-E-Modul in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels bei konstanter Kornrohddichte q_r

$E_m \times 10^3 \text{ [kp/cm}^2\text{]}$

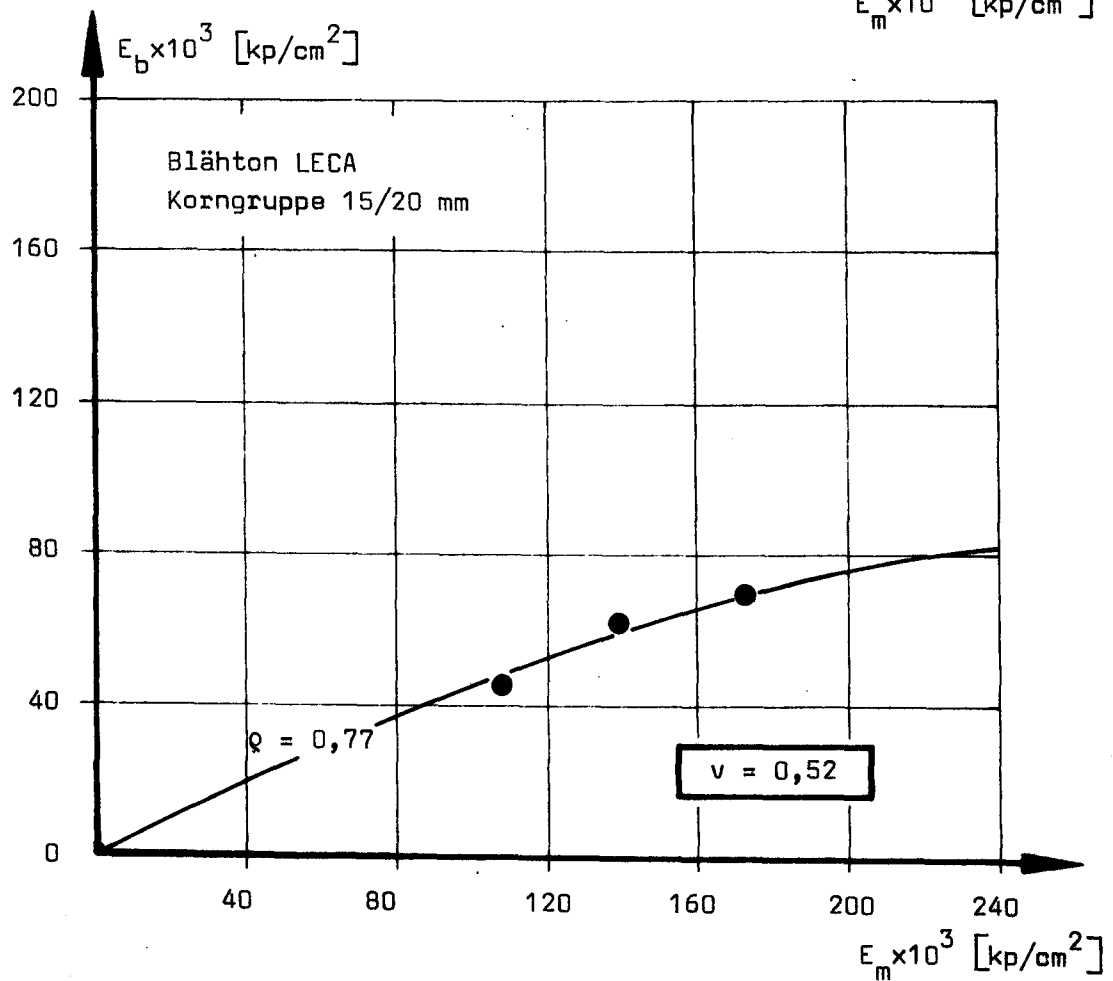
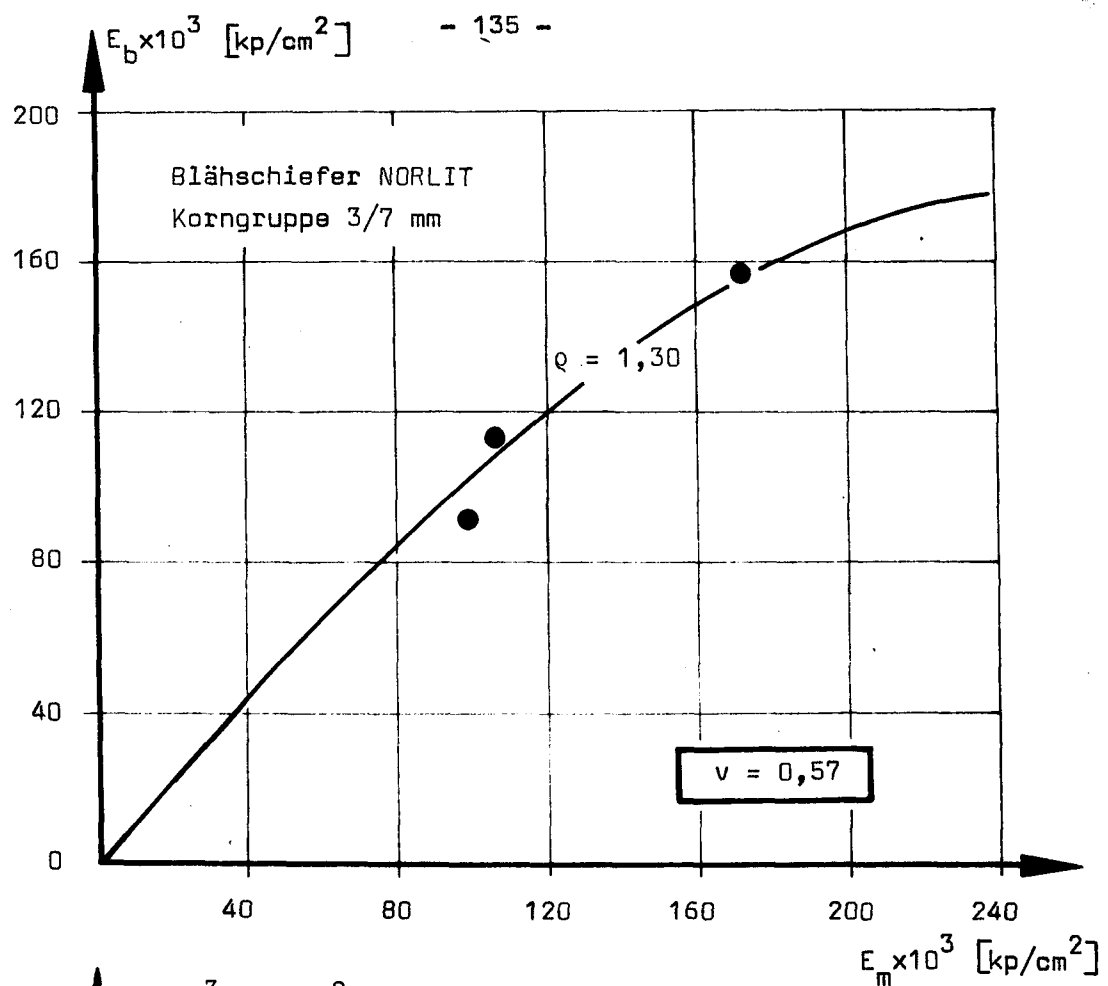


Abb. 19 Einkornbeton-E-Modul in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels bei konstanter Kornrohddichte q_r

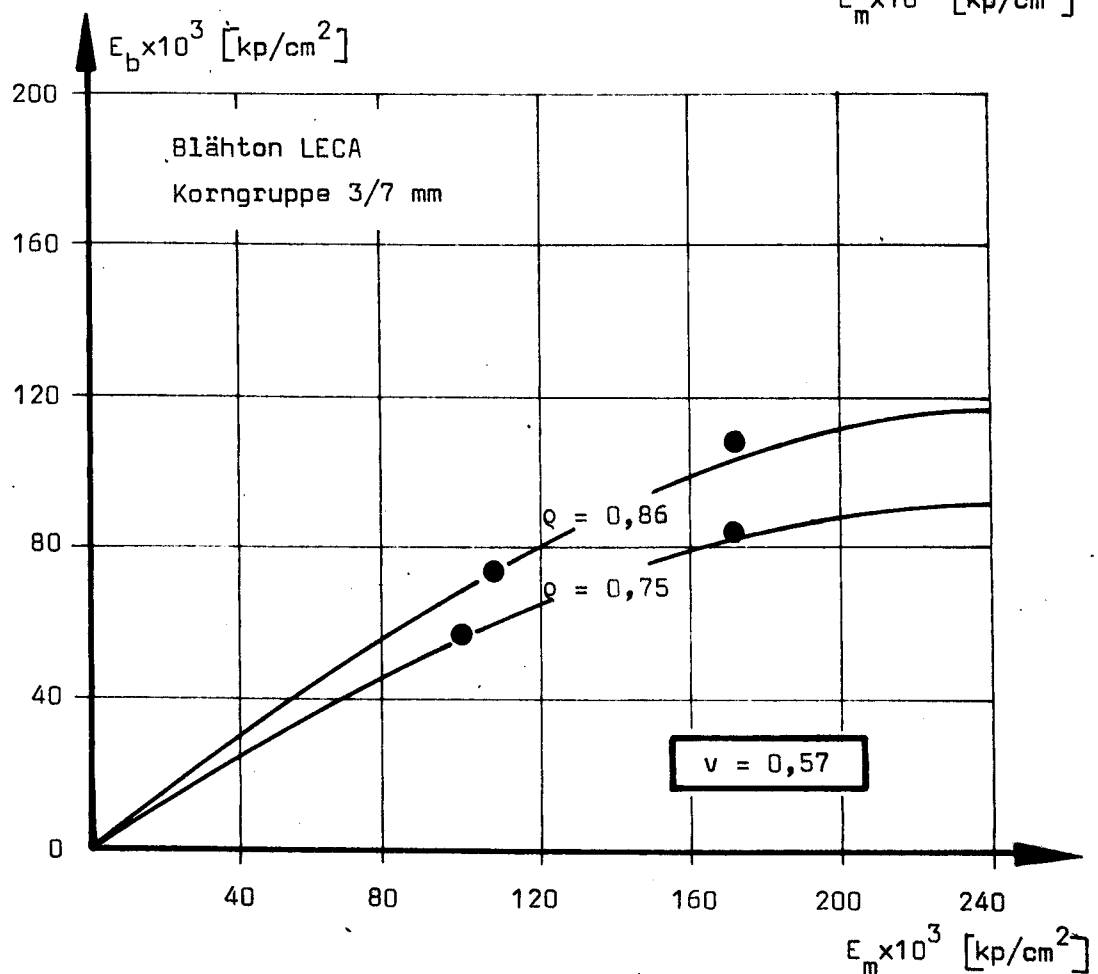
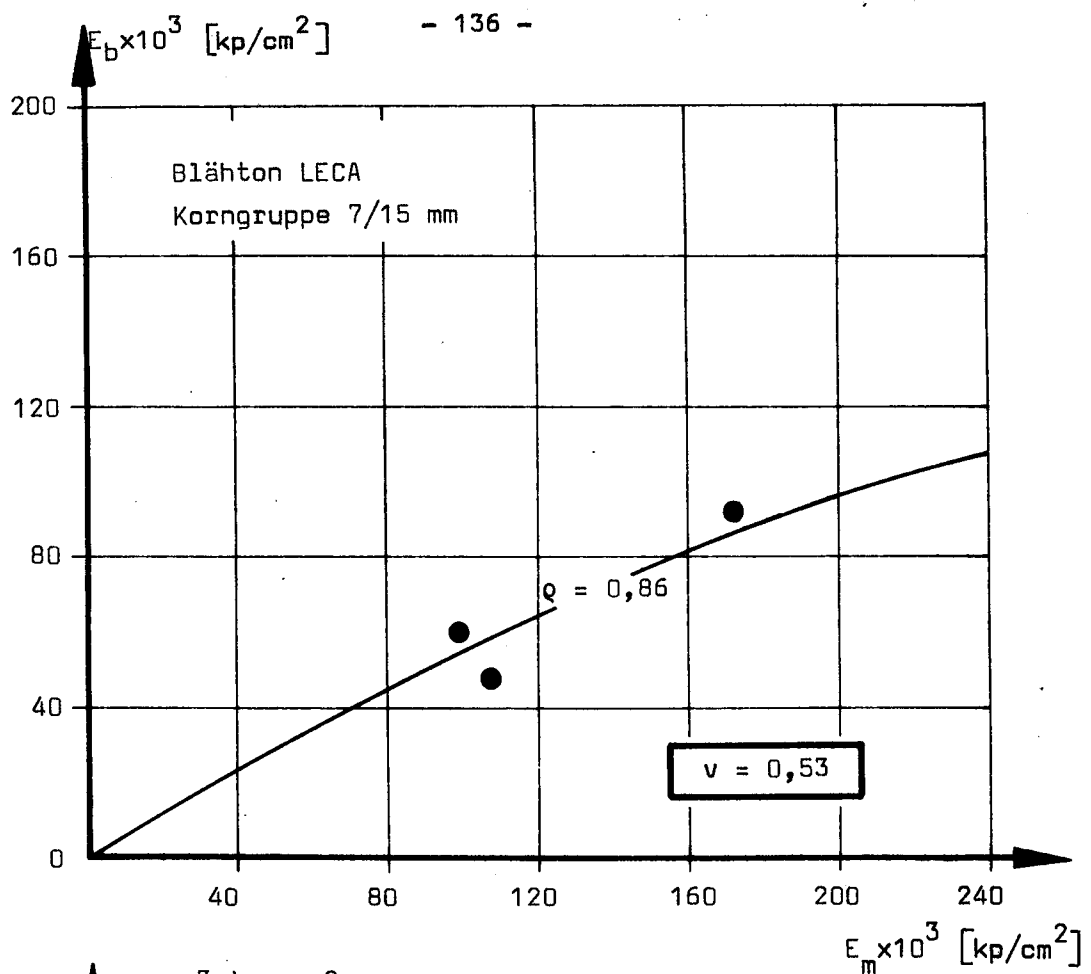


Abb. 20 Einkornbeton-E-Modul in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels bei konstanter Kornrohddichte ρ_r

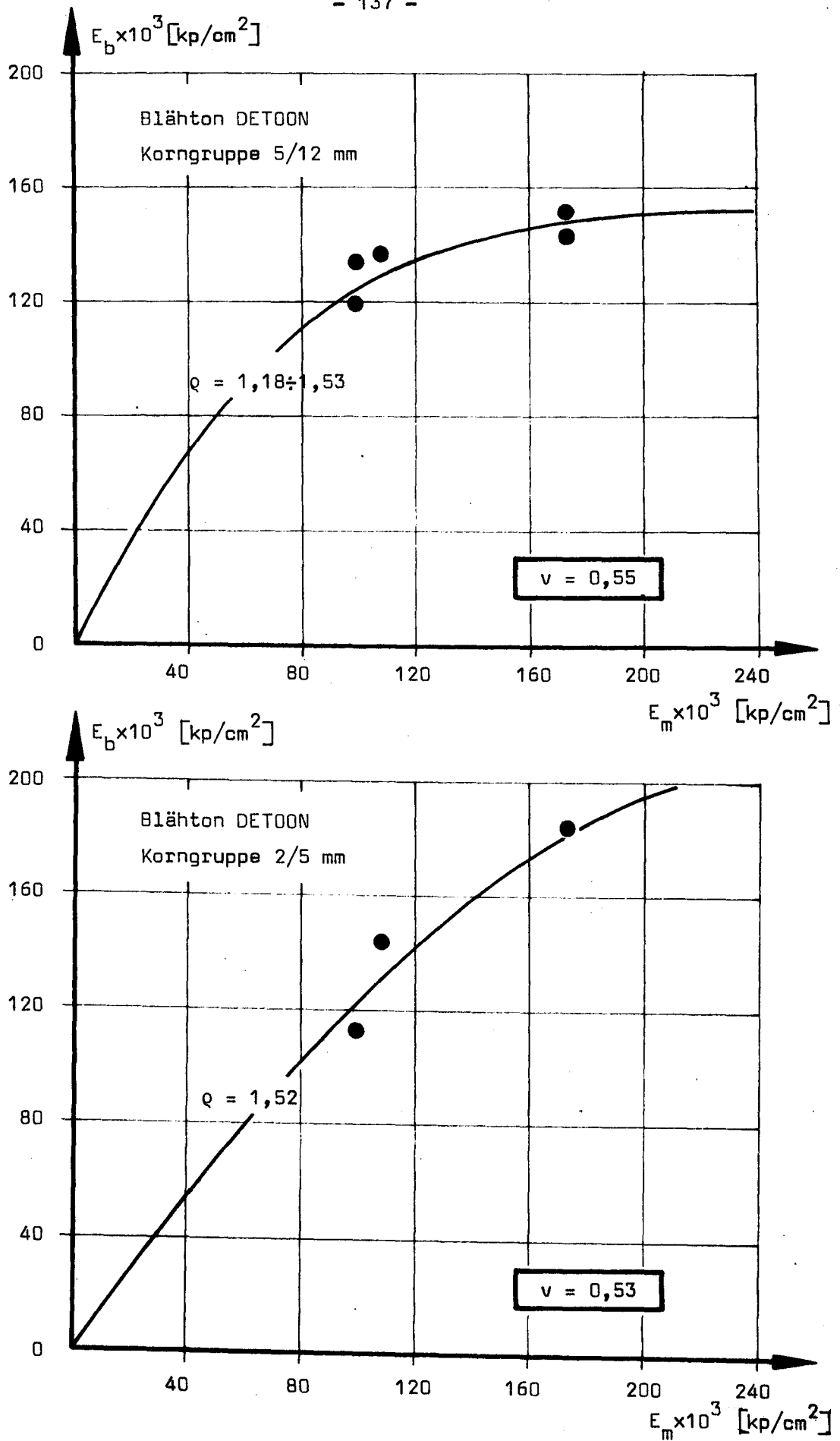


Abb. 21 Einkornbeton-E-Modul in Abhängigkeit vom E-Modul des Mörtels bei konstanter Kornrohichte q_r

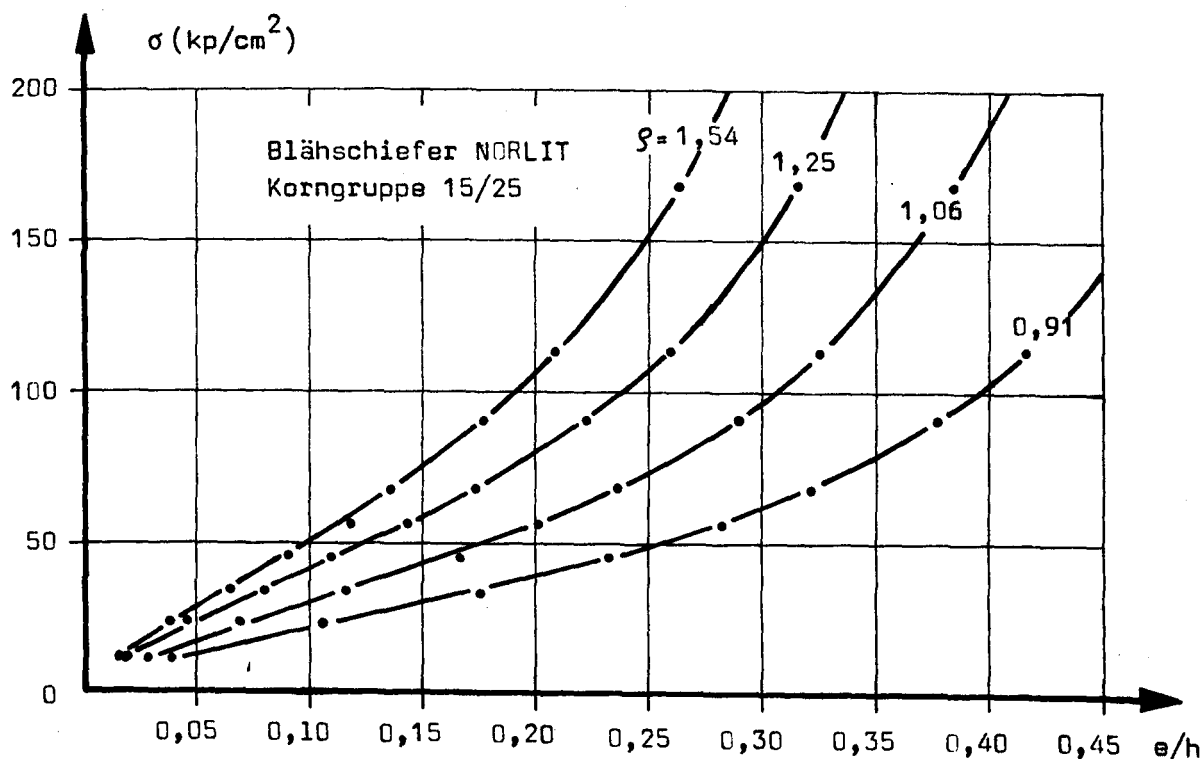


Abb. 22 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Norlit 15/25 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

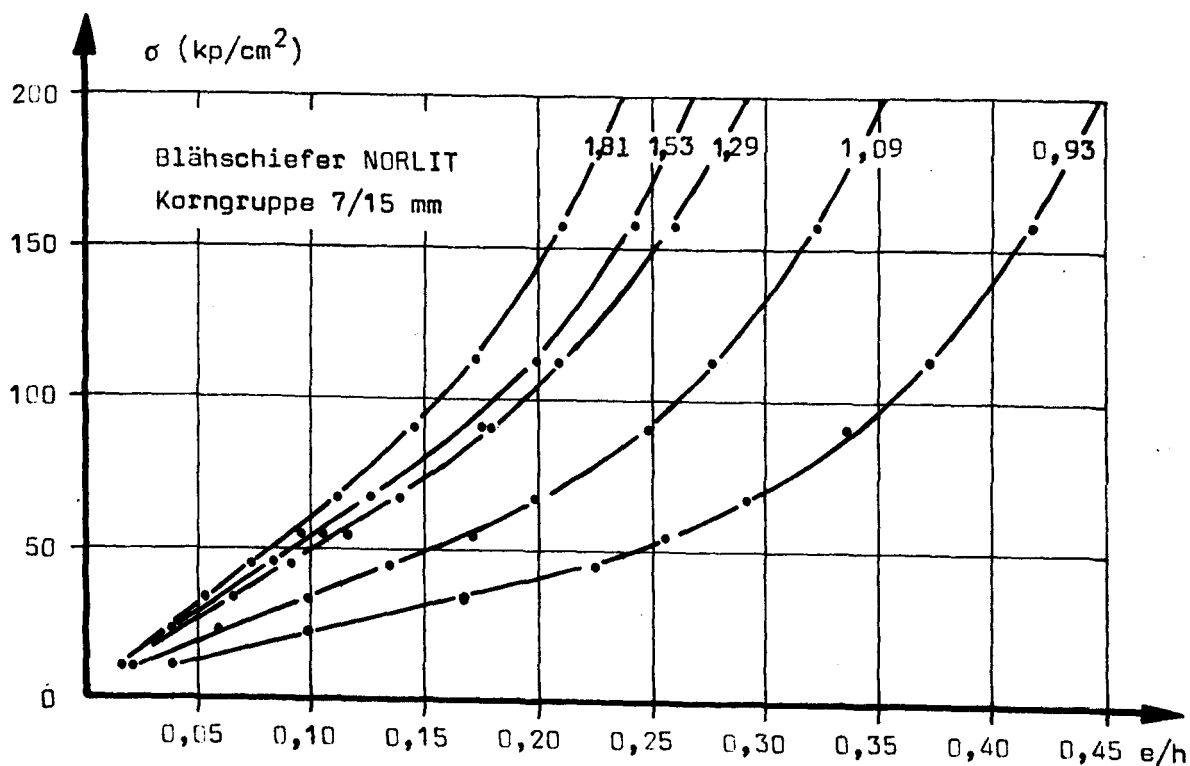


Abb. 23 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Norlit 7/15 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

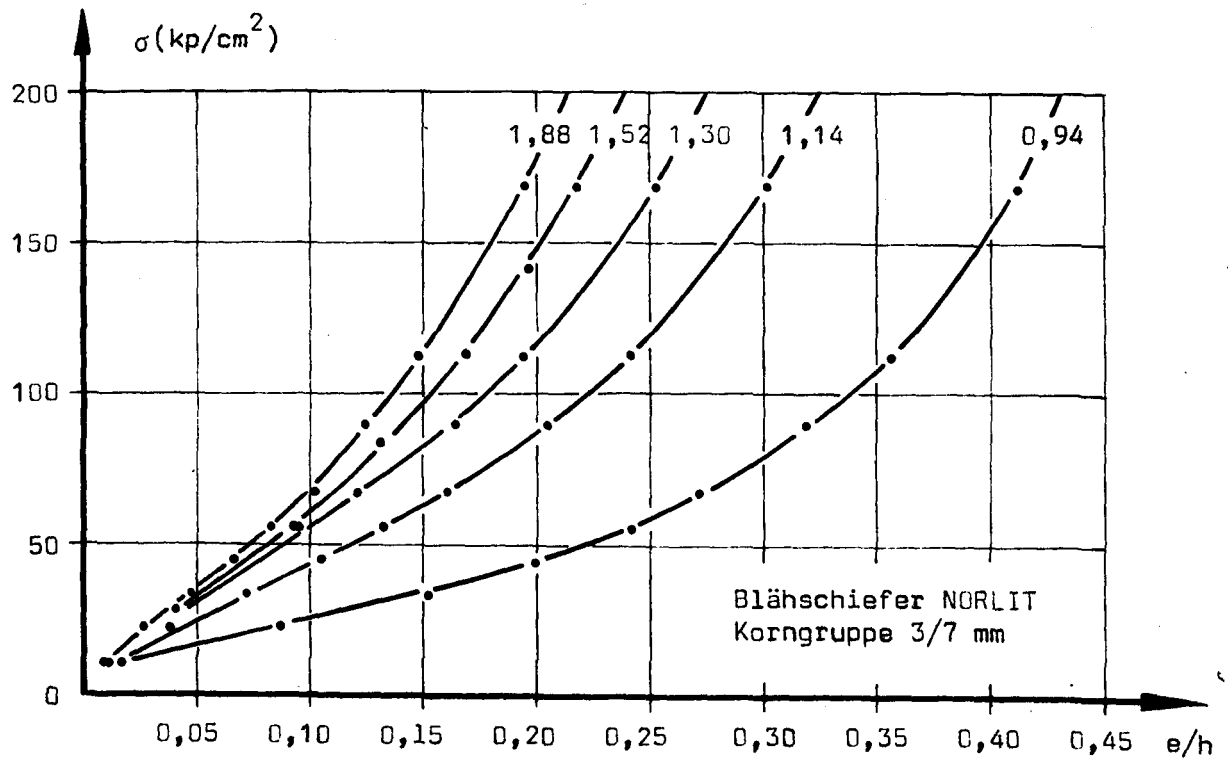


Abb. 24 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Norlit 3/7 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

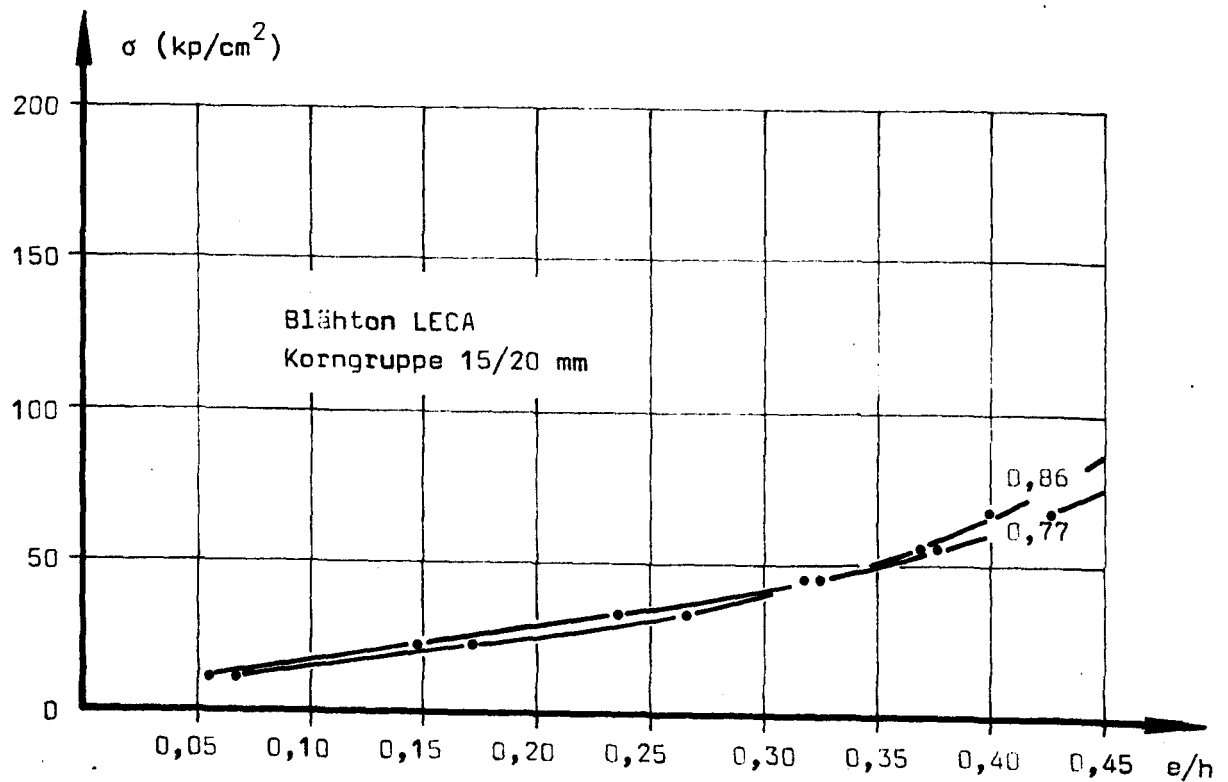


Abb. 25 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Leca 15/20 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

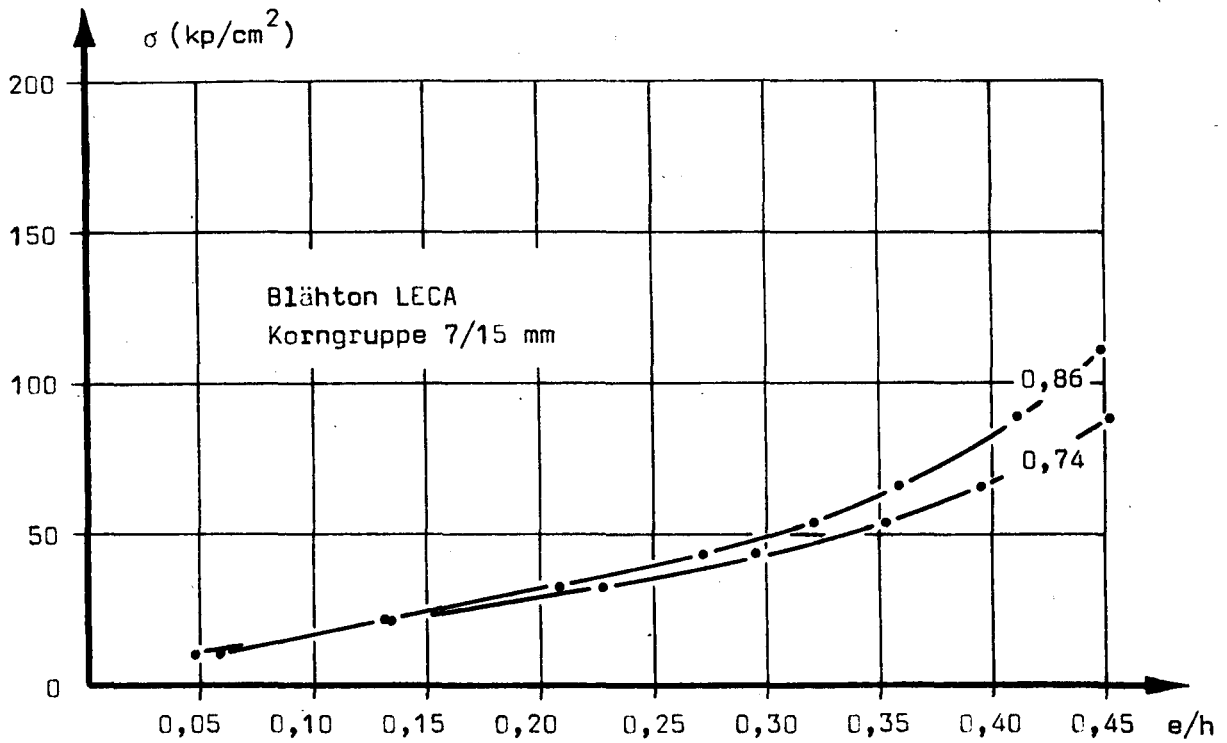


Abb. 26 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Leca 7/15 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder d = 75 mm)

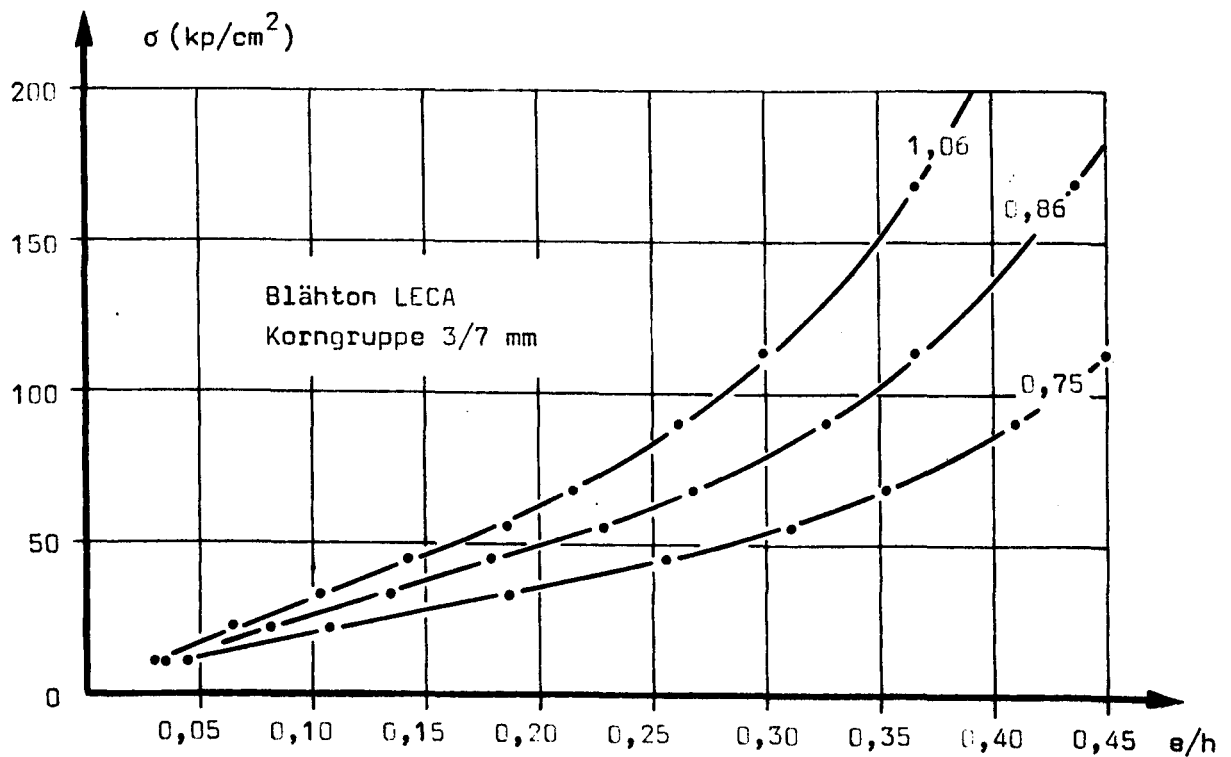


Abb. 27 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an Leca 3/7 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder d = 75 mm)

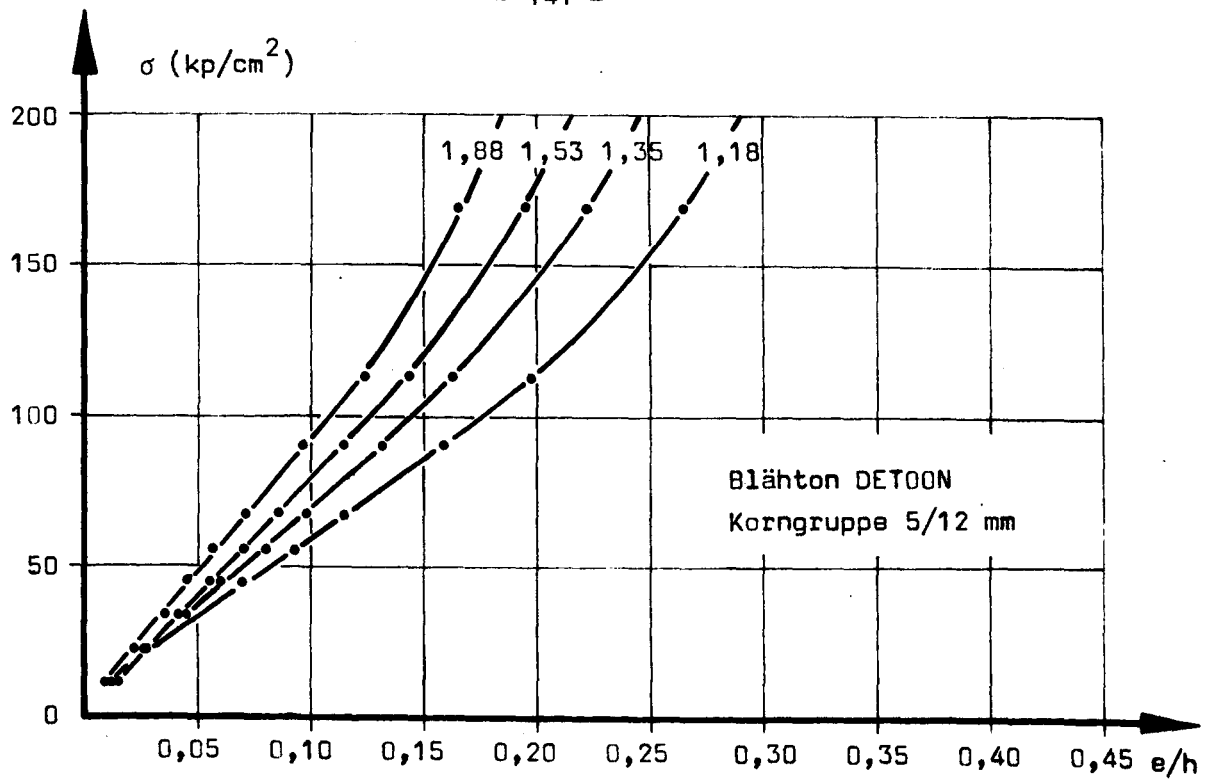


Abb. 28 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an detoon 5/12 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

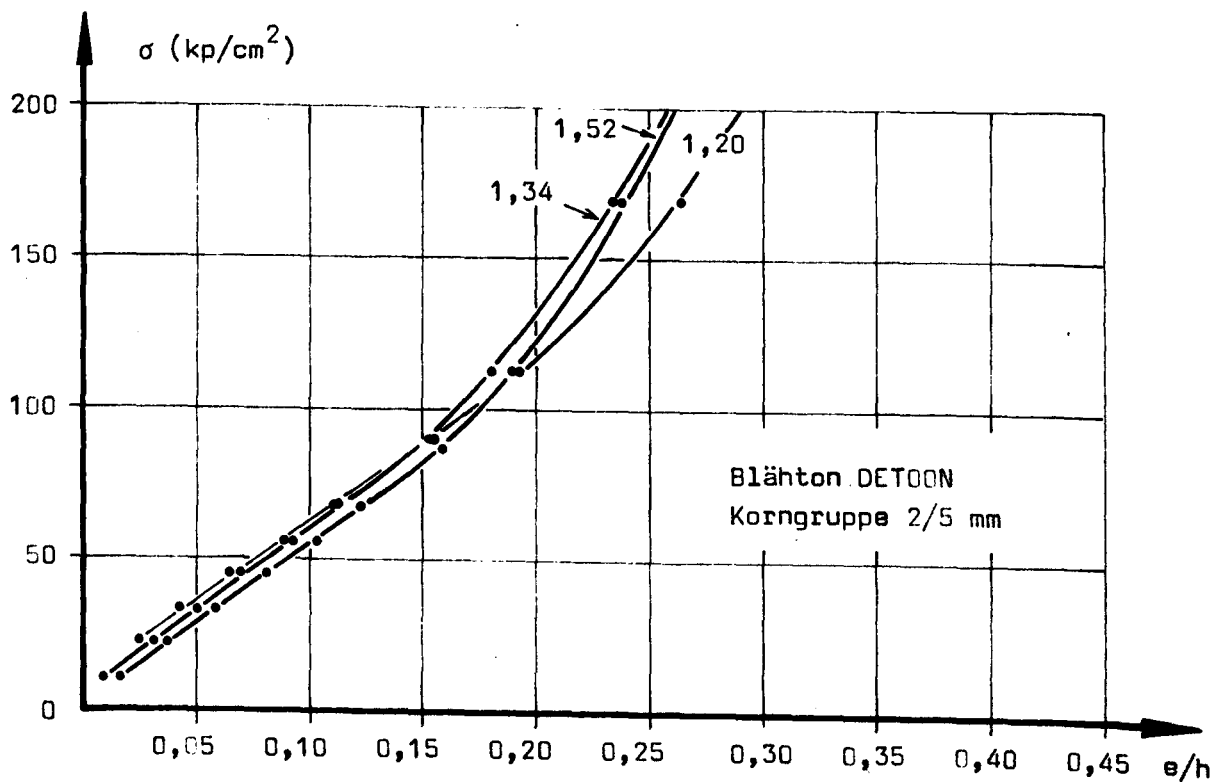


Abb. 29 Spannungs-Verformungs-Zusammenhang des Zuschlag-Druckversuchs an detoon 2/5 mm in Abhängigkeit von der Kornrohddichte (Druckzylinder $d = 75$ mm)

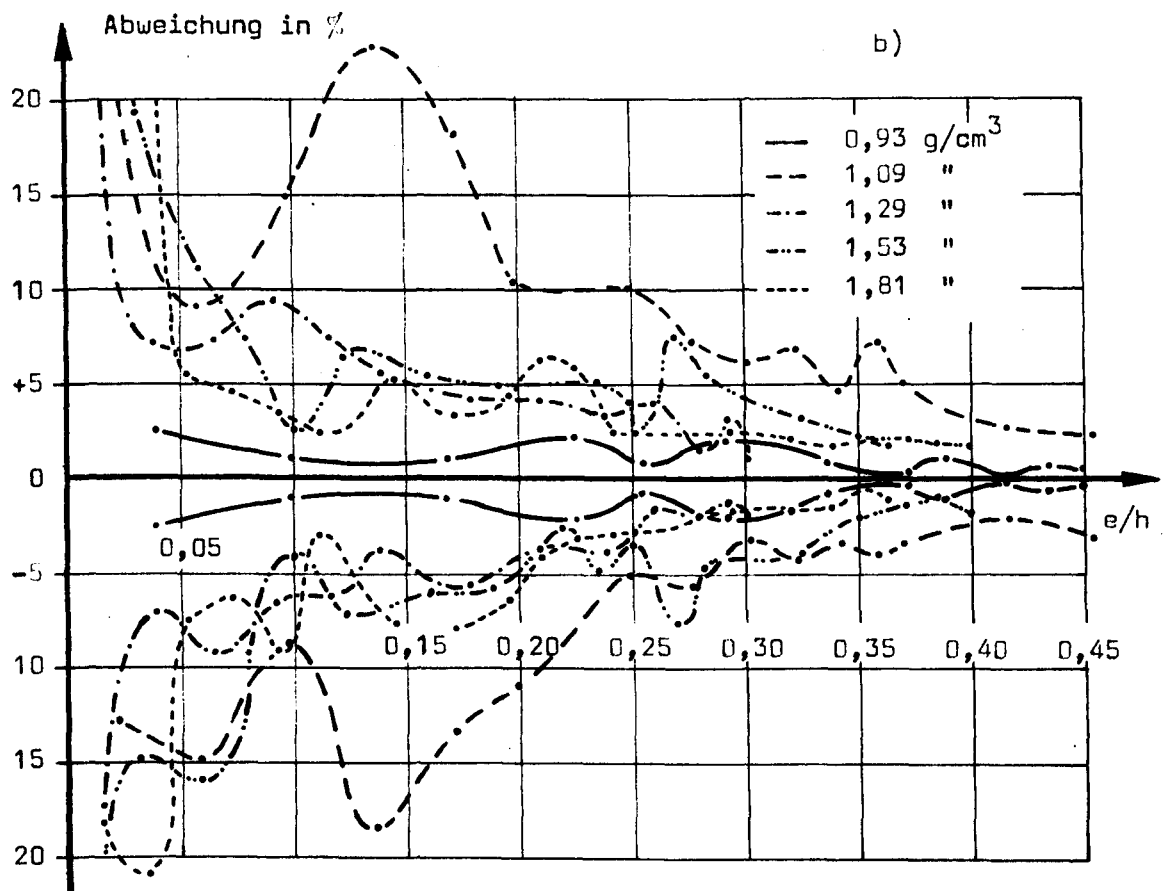
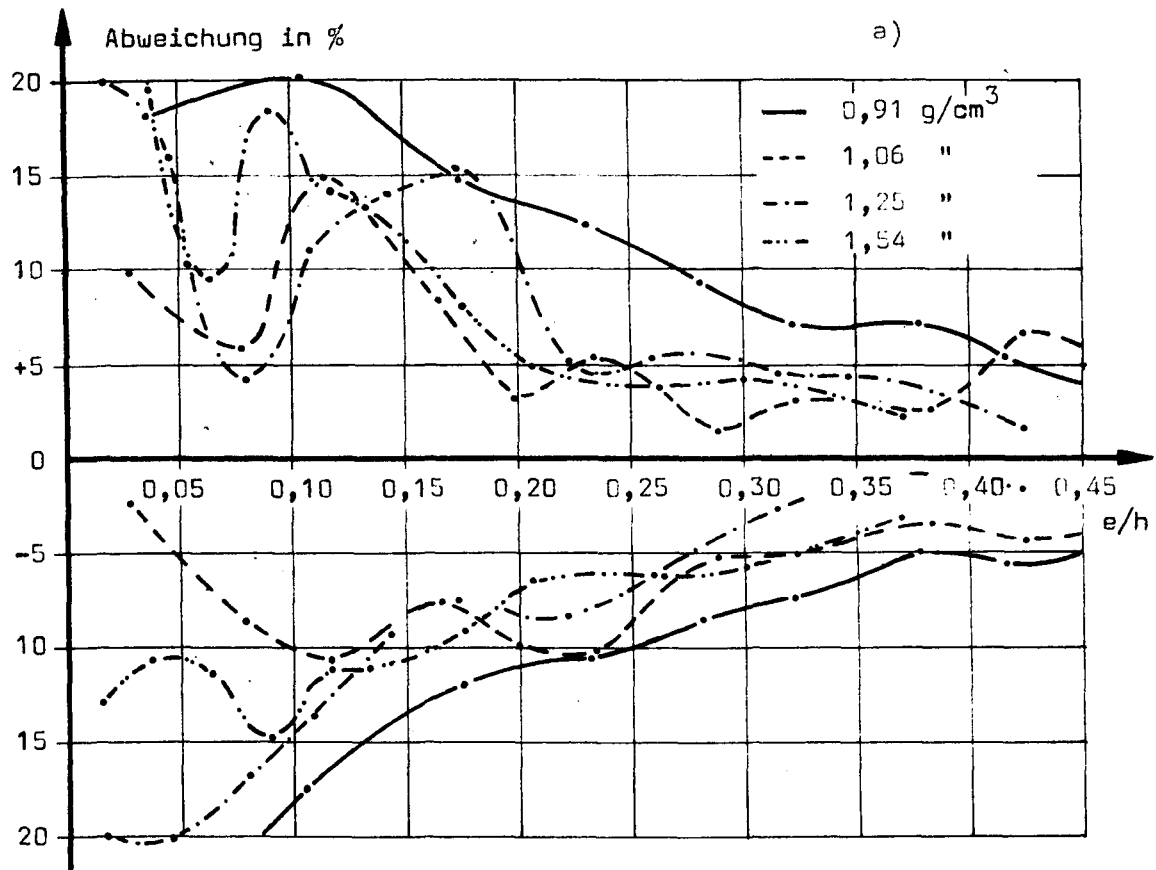


Abb. 30 Größte Abweichungen der bezogenen Zusammendrückung e/h vom Mittelwert in Abhängigkeit von den untersuchten Kornrohdichten für a) Norlit 15/25, b) Norlit 7/15

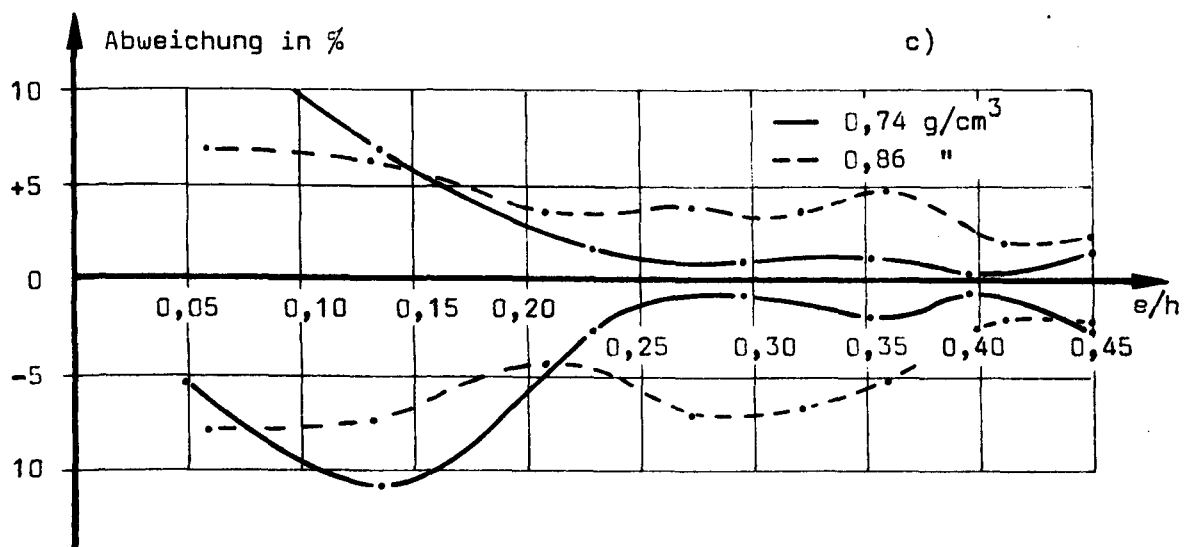
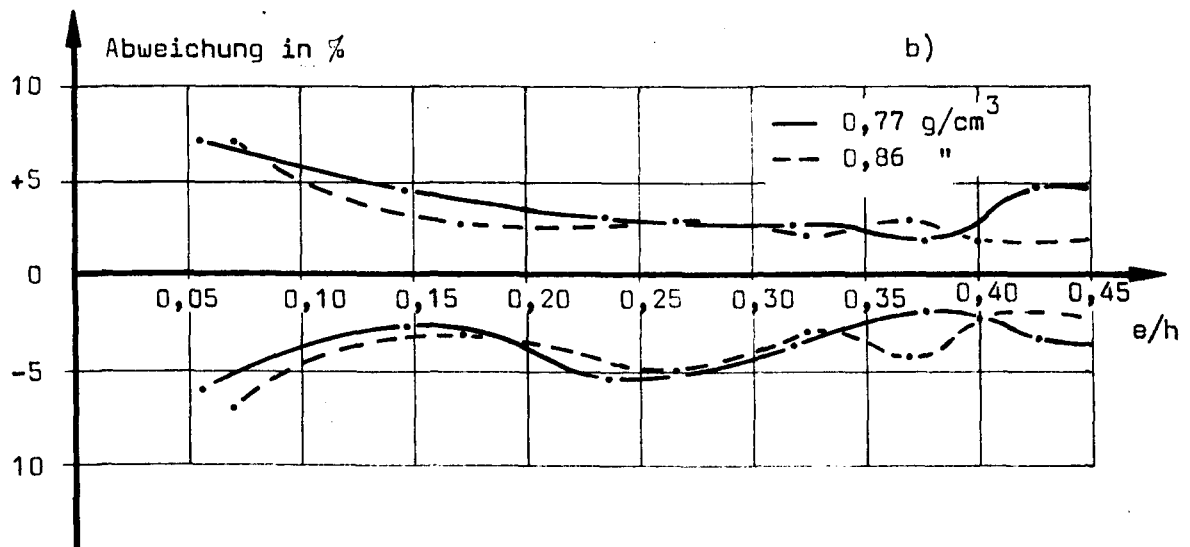
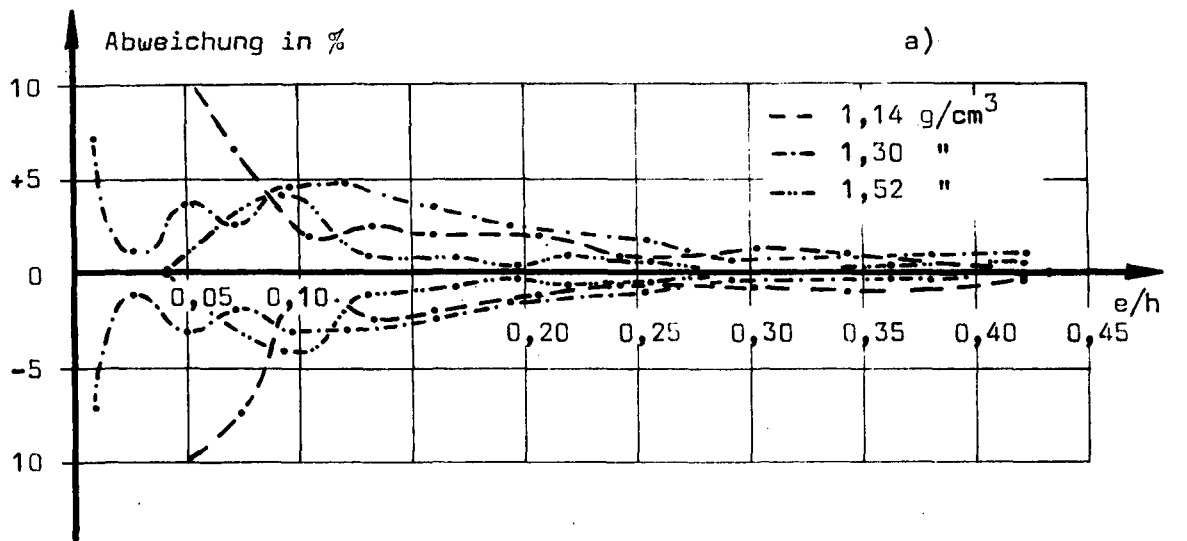


Abb. 31 Größte Abweichungen der bezogenen Zusammendrückung e/h vom Mittelwert in Abhängigkeit von den untersuchten Kornrohdichten für a) Norlit 3/7, b) Leca 15/20, c) Leca 7/15

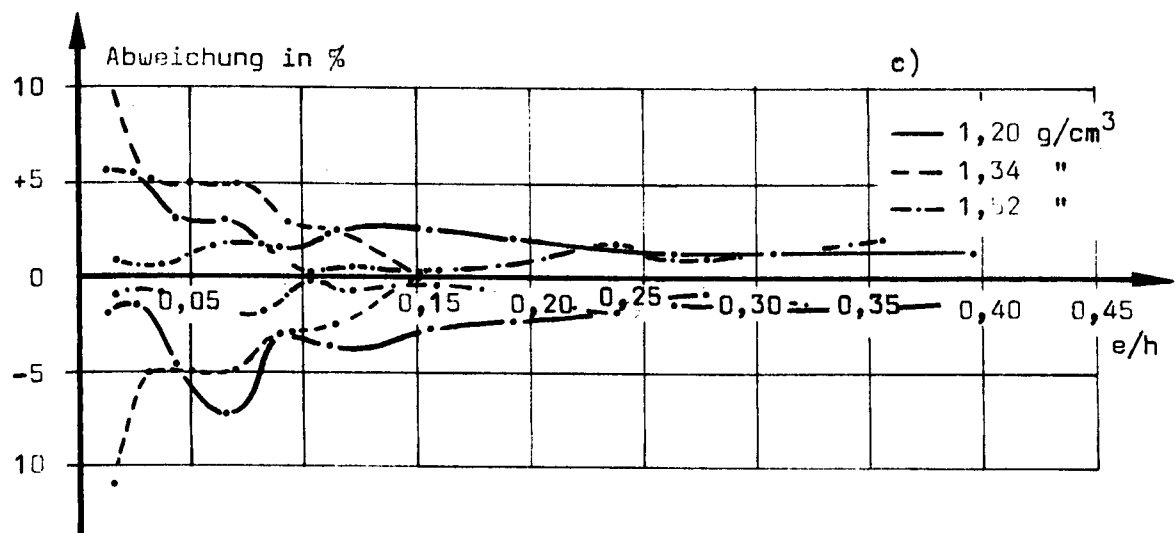
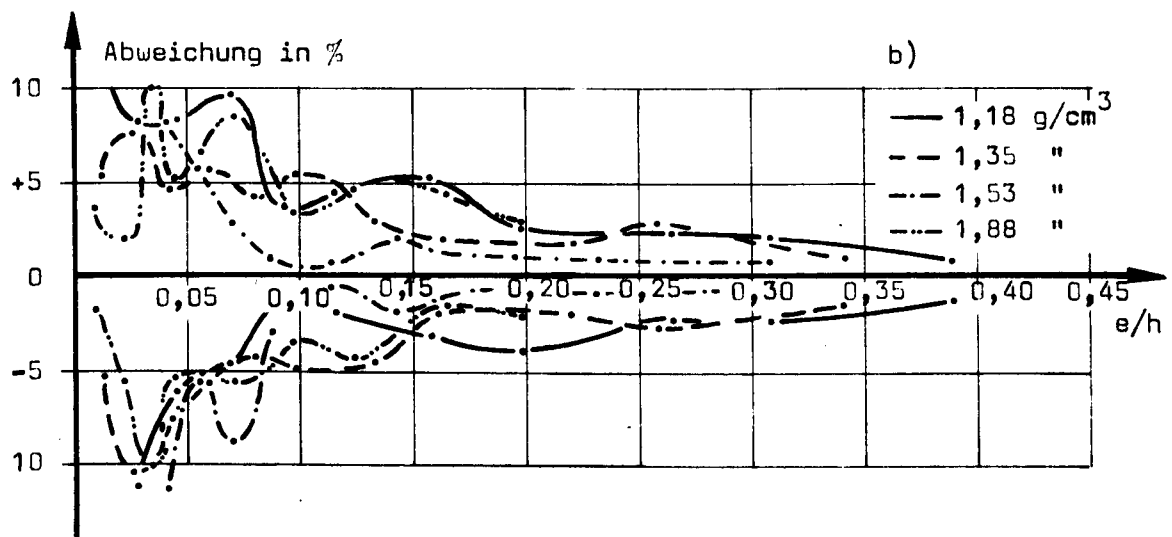
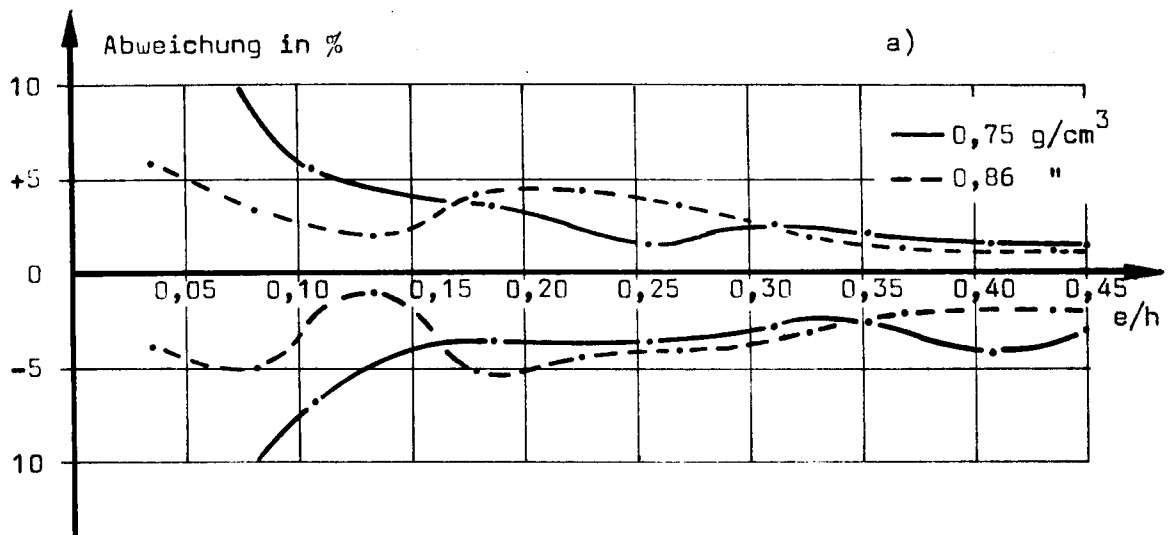


Abb. 32 Größte Abweichungen der bezogenen Zusammendrückung e/h vom Mittelwert in Abhängigkeit von den untersuchten Kornrohdichten für a) Leca 3/7, b) detoon 5/12, c) detoon 2/5

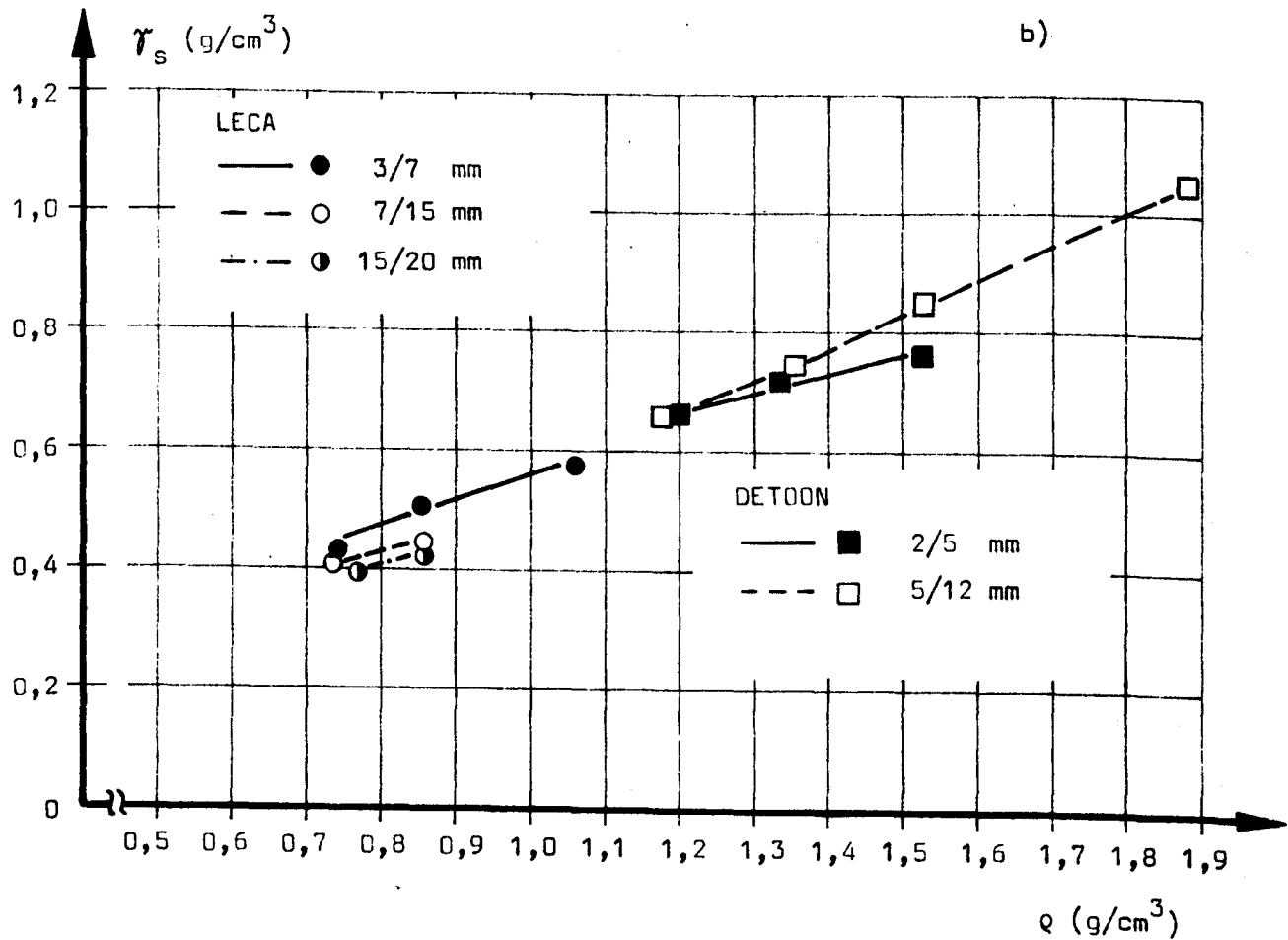
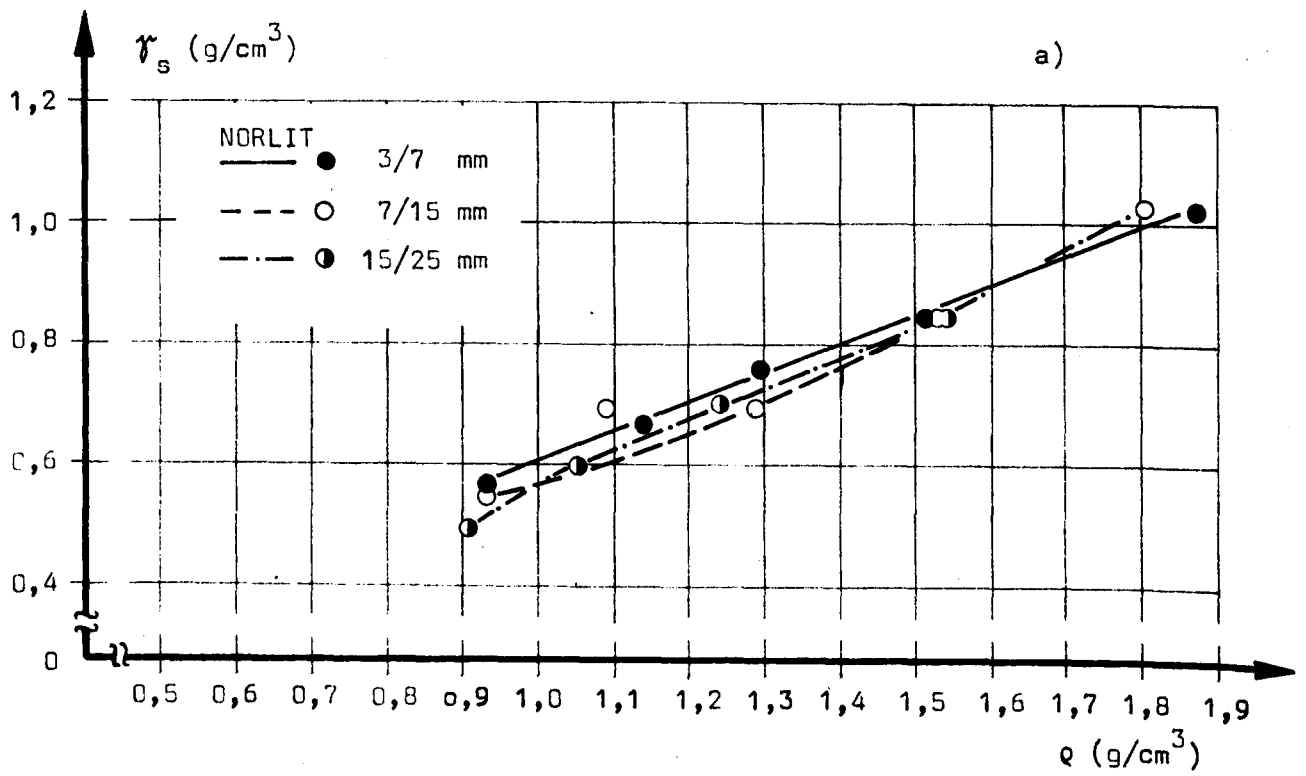


Abb. 33 Schüttdichten der Zuschlag-Druckversuche für
a) Norlit, b) Leca und detoon

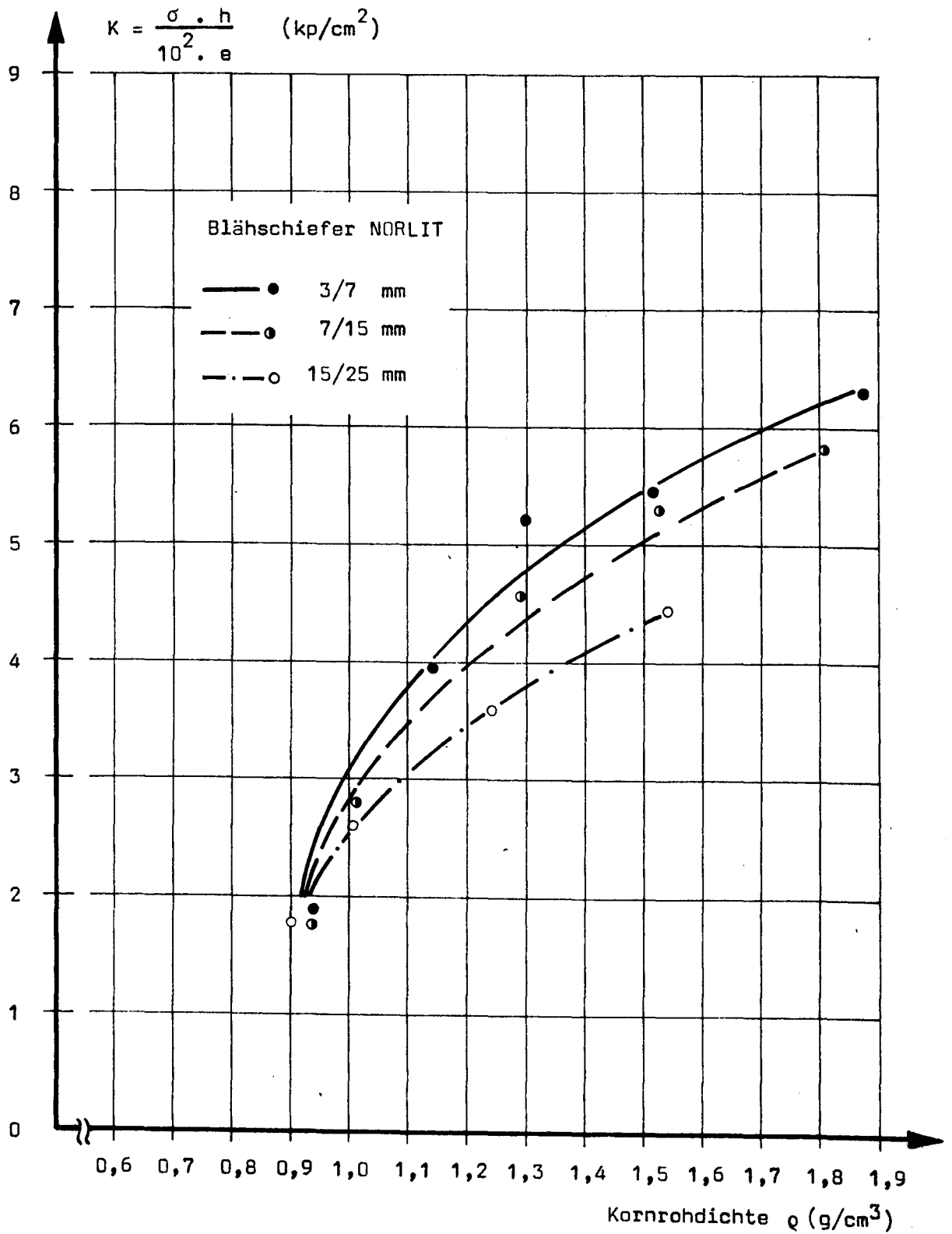


Abb. 34 Zusammenhang zwischen Zuschlagcharakteristik K und Kornrohddichte für Blähschiefer Norlit

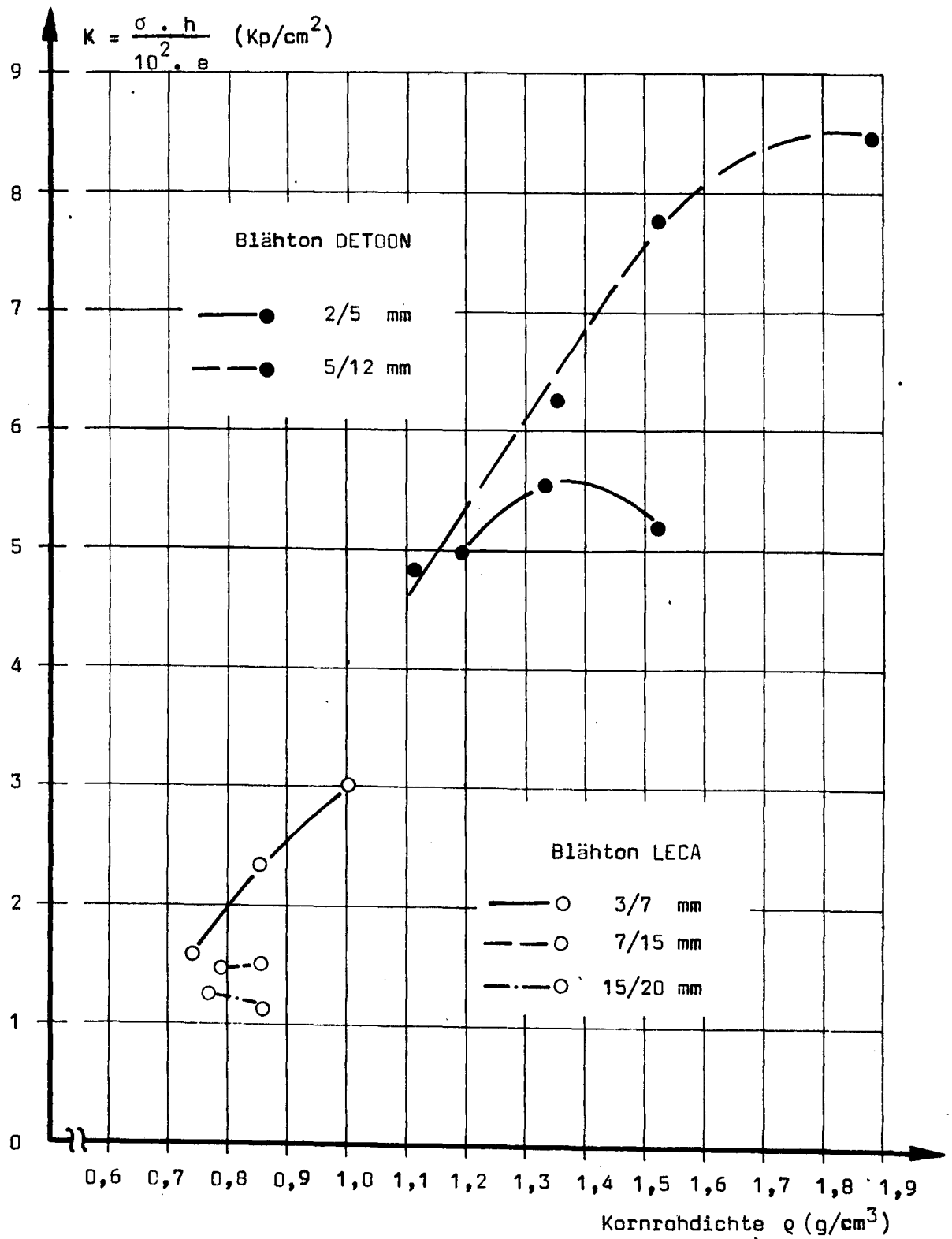


Abb. 35 Zusammenhang zwischen Zuschlagcharacteristik K und Kornrohddichte für Blähton detoon und Leca

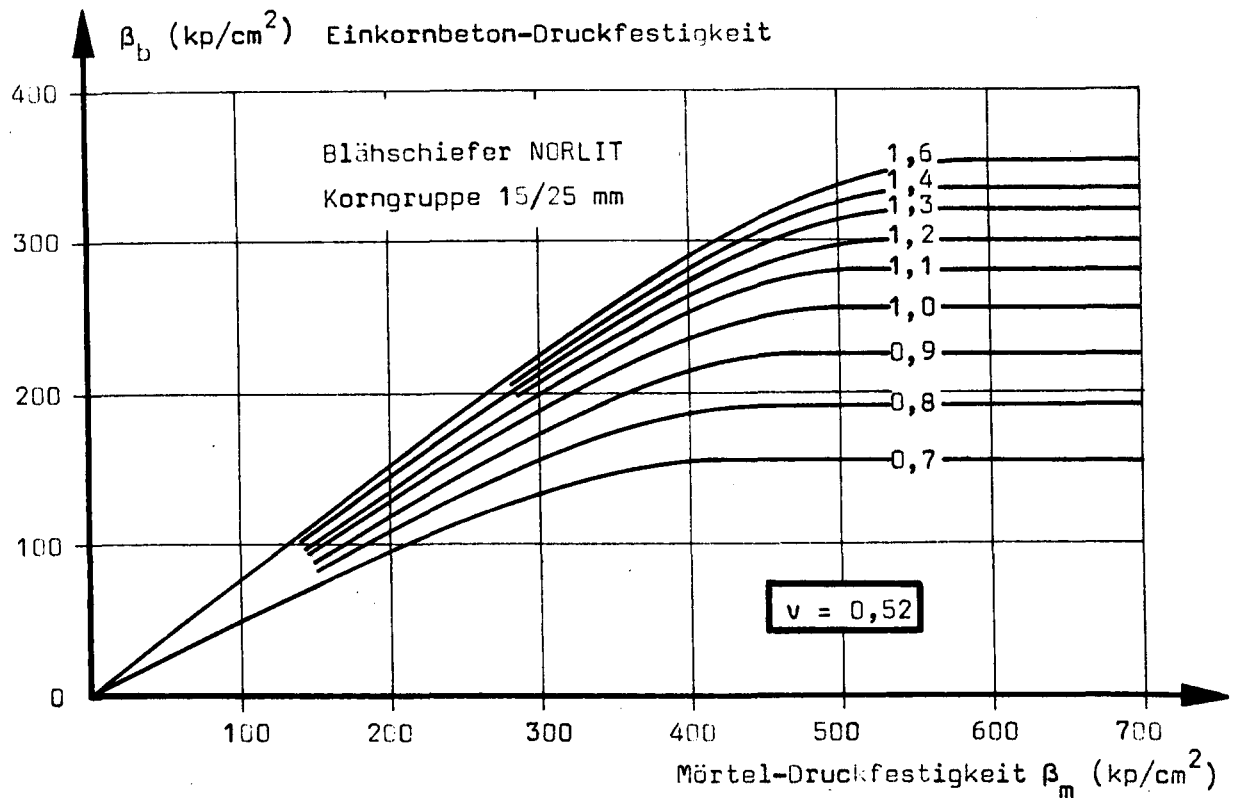


Abb. 36 Festigkeitsdiagramm für Norlit 15/25 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

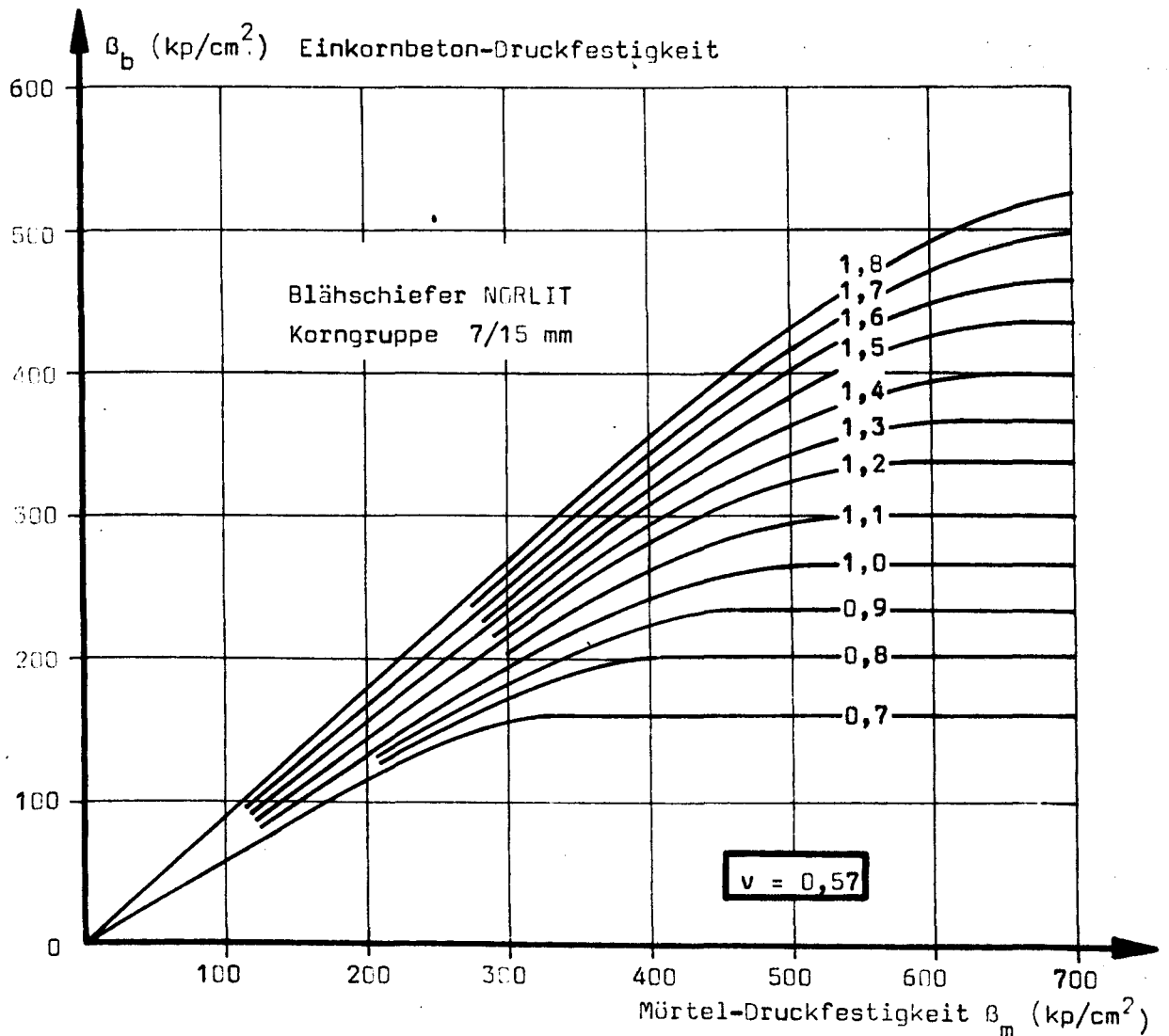


Abb. 37 Festigkeitsdiagramm für Norlit 7/15 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

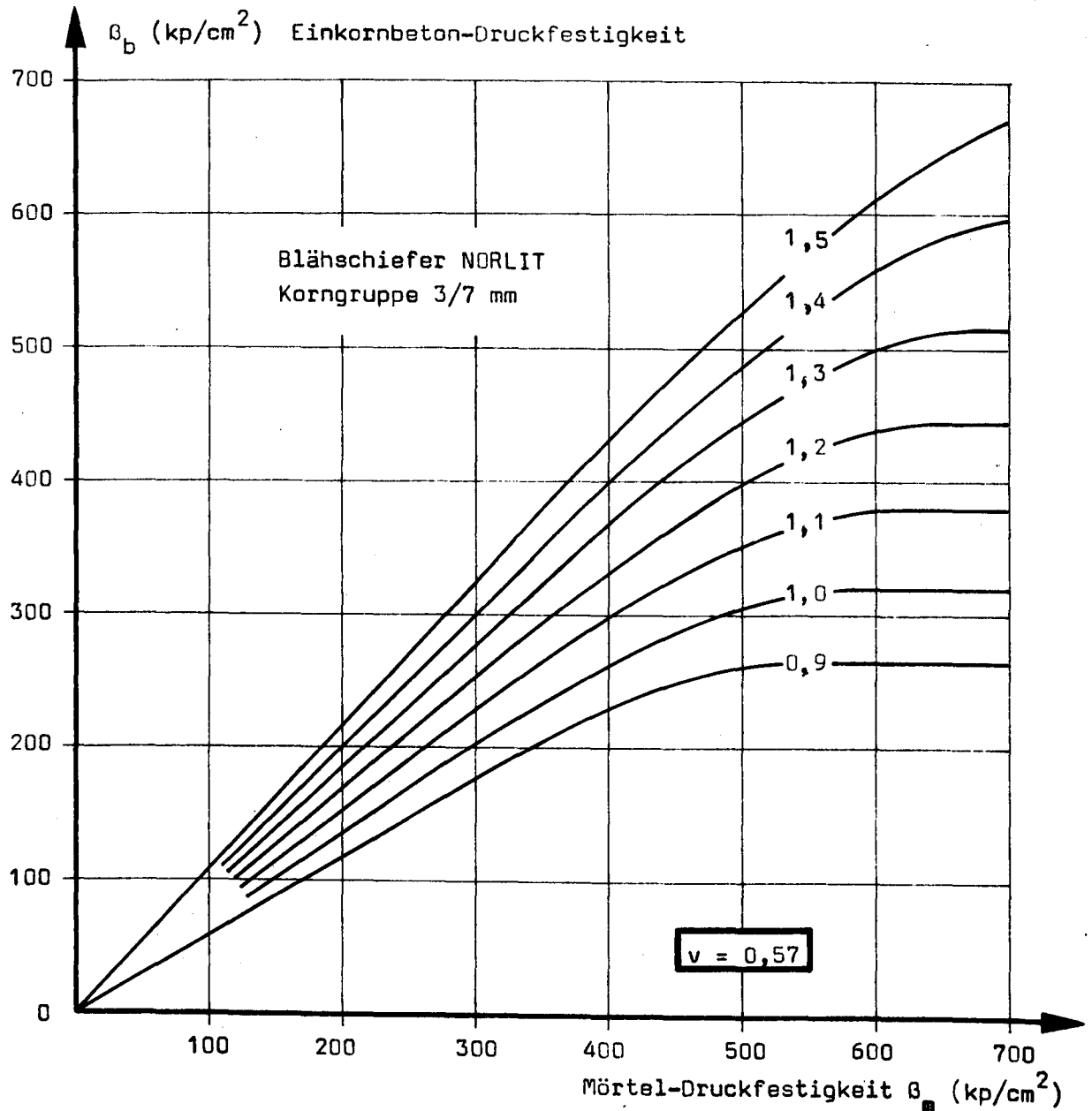


Abb. 38 Festigkeitsdiagramm für Norlit 3/7 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

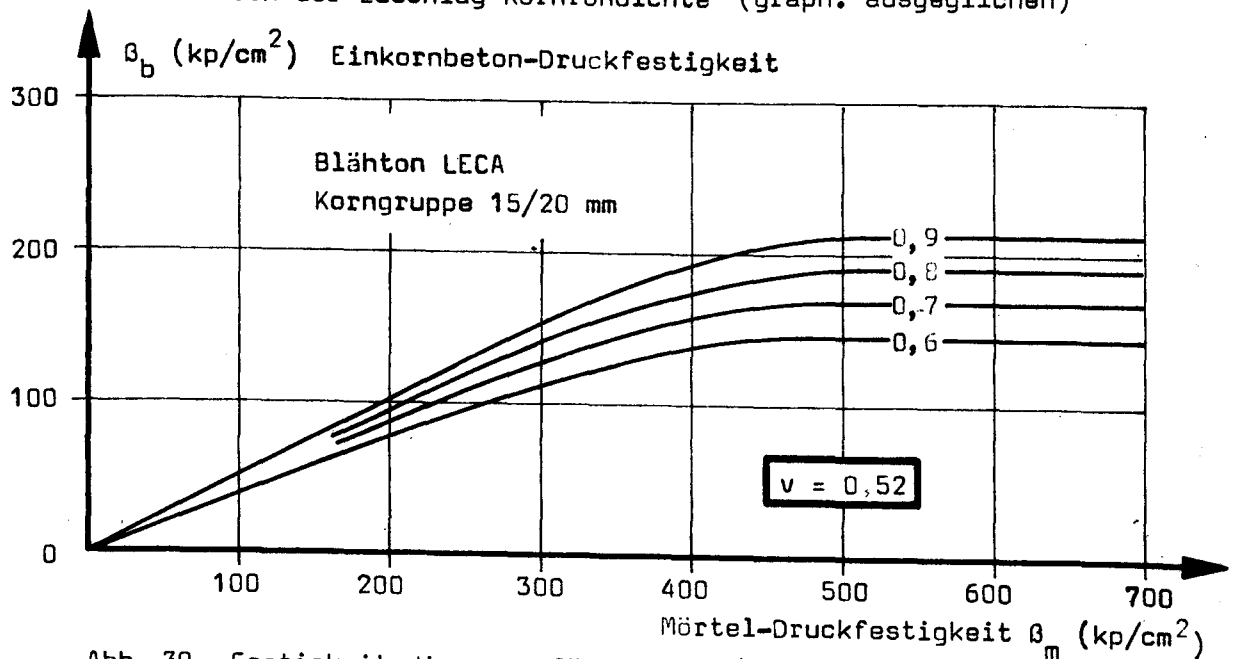


Abb. 39 Festigkeitsdiagramm für Leca 15/20 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

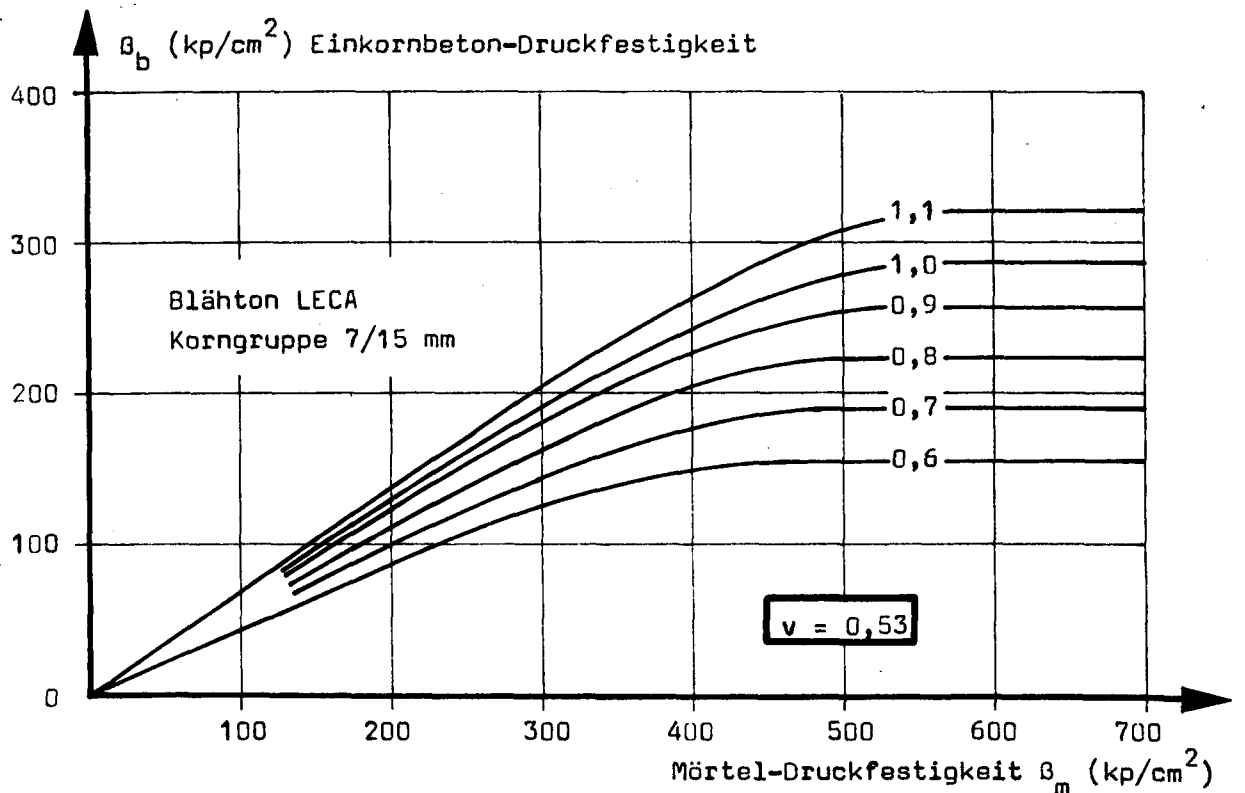


Abb. 40 Festigkeitsdiagramm für Leca 7/15 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

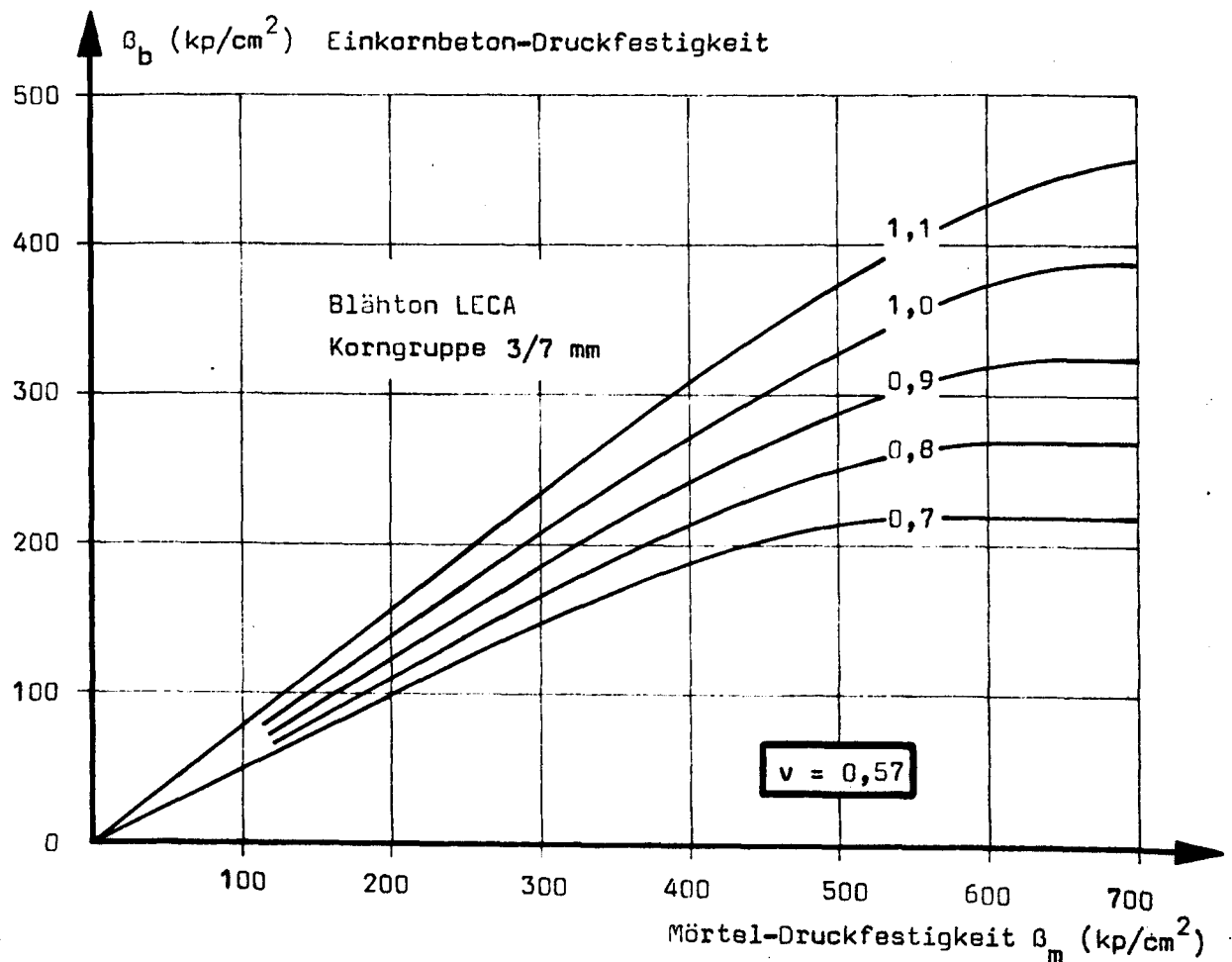


Abb. 41 Festigkeitsdiagramm für Leca 3/7 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

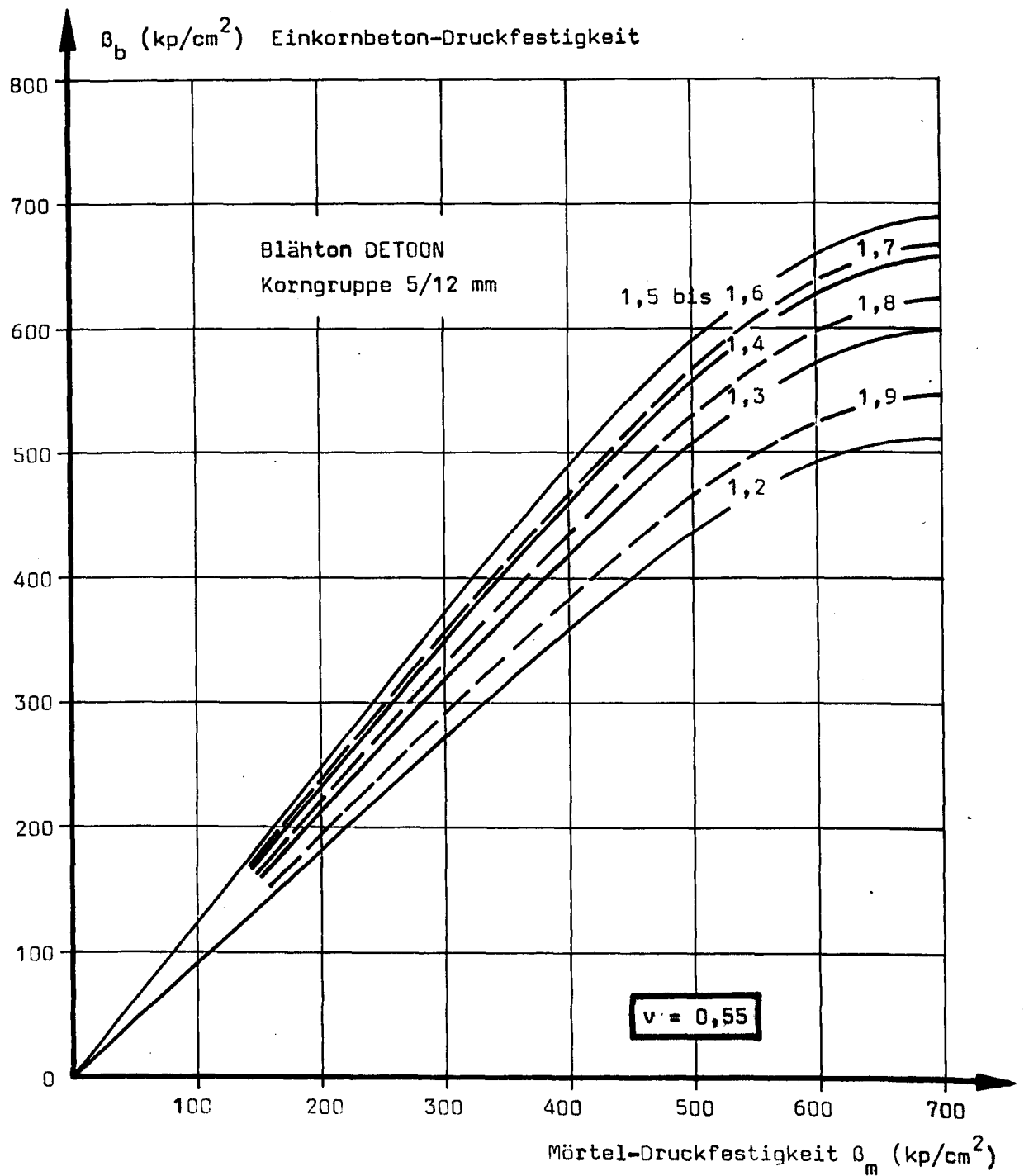


Abb.42 Festigkeitsdiagramm für detoon 5/12 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohdichte (graph. ausgeglichen)

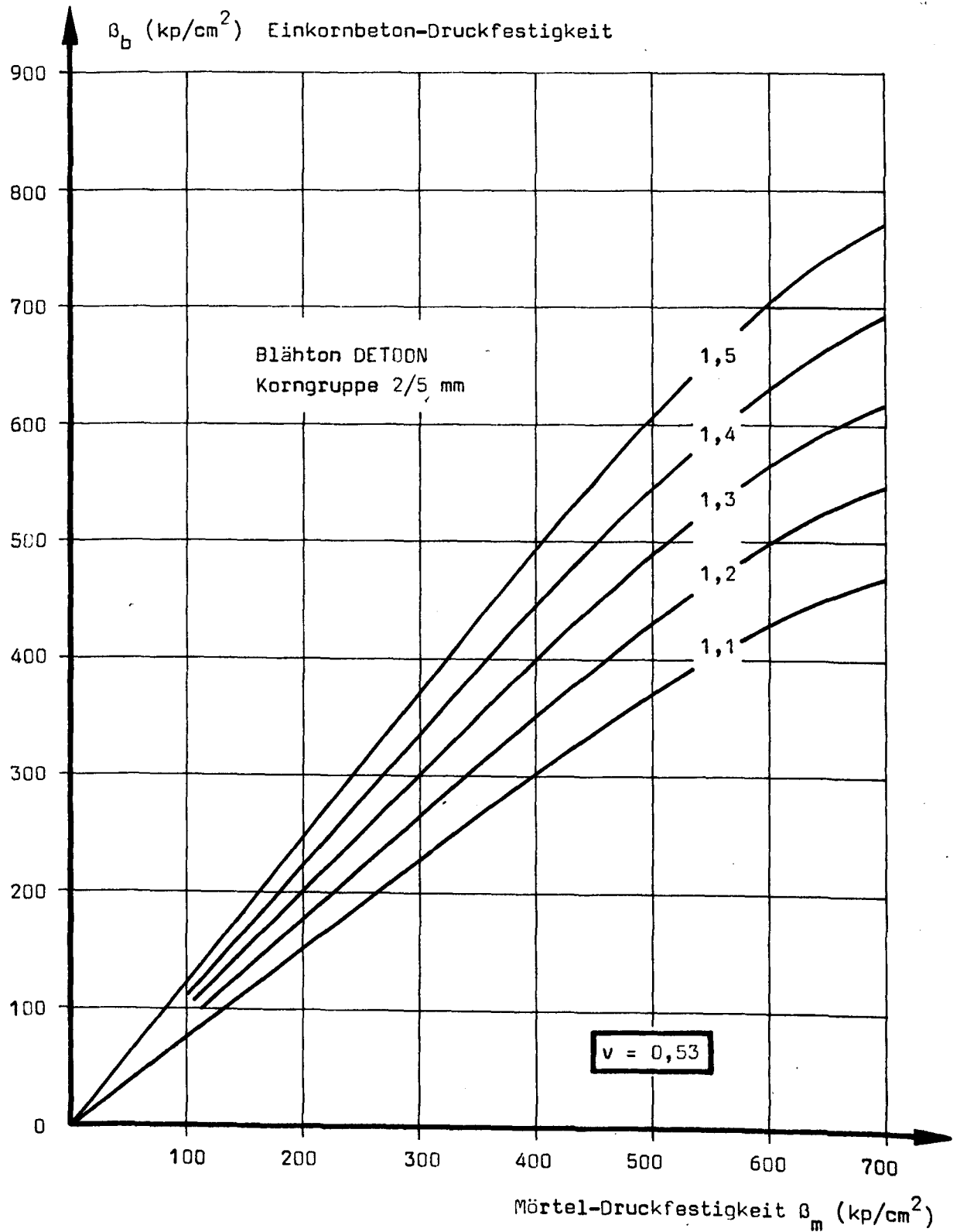


Abb. 43 Festigkeitsdiagramm für detoon 2/5 mm in Abhängigkeit von der Zuschlag-Kornrohddichte (graph. ausgeglichen)

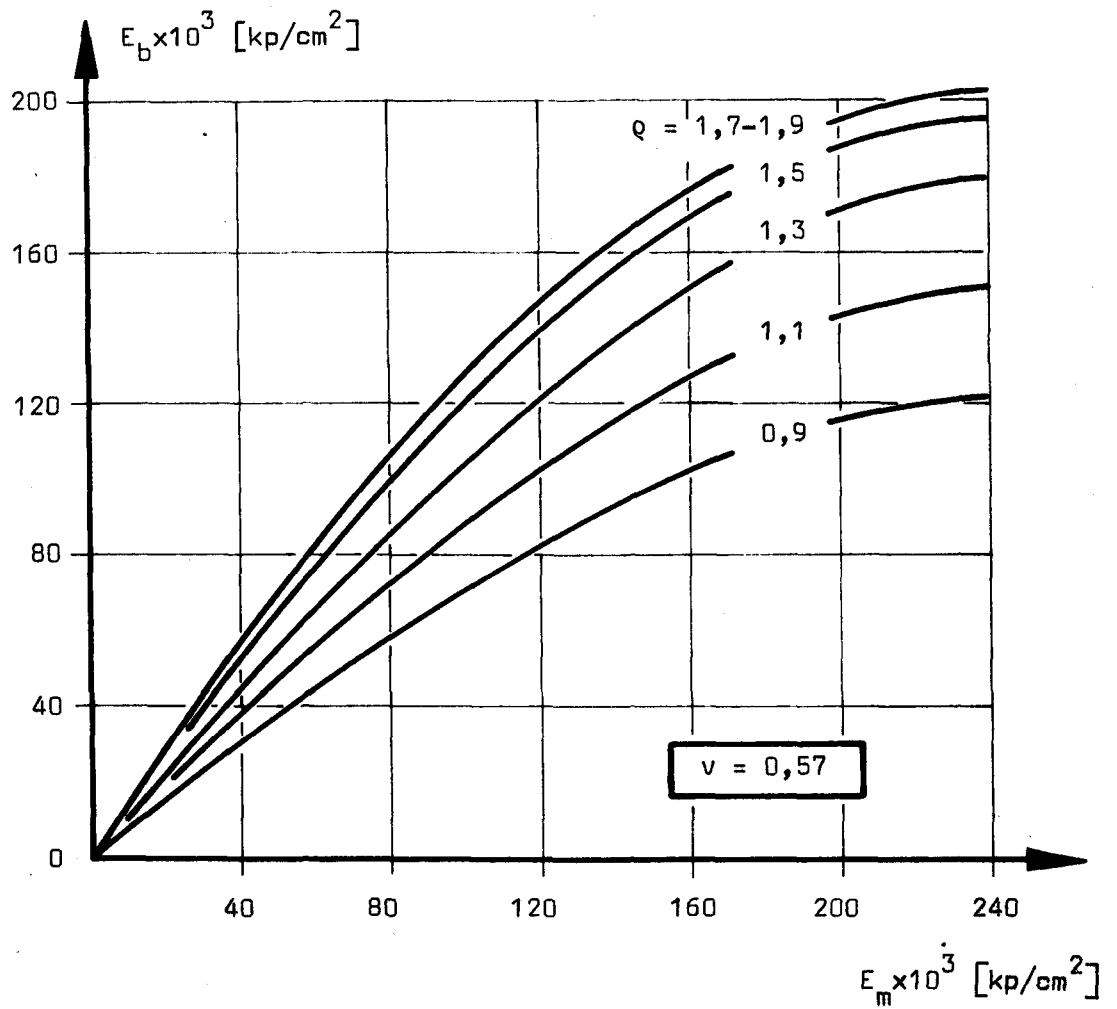


Abb. 44 E-Modul-Diagramm in Abhängigkeit von der Zuschlagkornrohdichte für Norlit 3 - 7 mm (Kurven graphisch ausgeglichen)

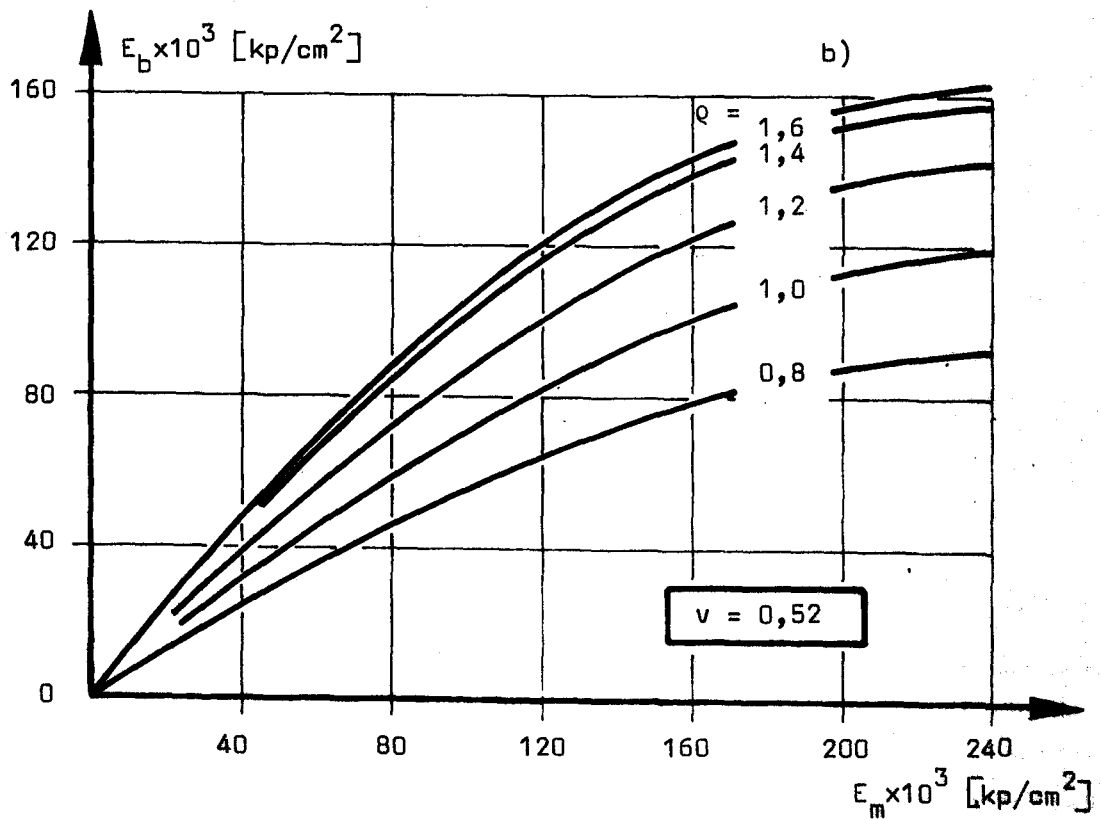
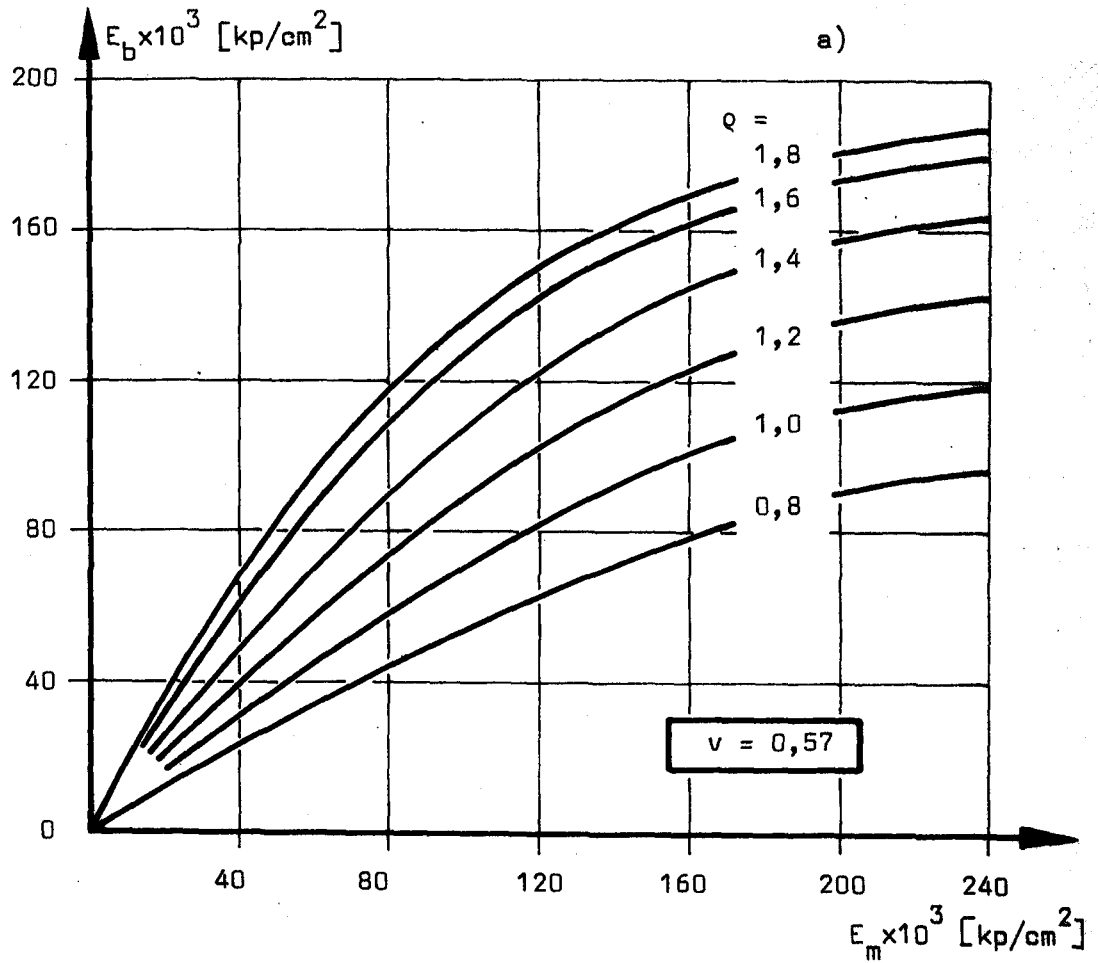


Abb. 45 E-Modul-Diagramm in Abhängigkeit von der Zuschlagkornrohdichte für Norlit
a) 7 - 15 mm, b) 15 - 25 mm
(Kurven graphisch ausgeglichen)